UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Facultad de Ciencias

Escuela Centroamericana de Geología

BALANCE HÍDRICO DE LA CIMA DE LOS VOLCANES IRAZÚ Y TURRIALBA Y SU AFECTACIÓN A LA ACTIVIDAD HIDROTERMAL SUPERFICIAL

Presentado por las estudiantes:

Yemerith Alpízar Segura

Priscilla Vargas Calderón

Tesis para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Julio 2016

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Facultad de Ciencias

Escuela Centroamericana de Geología

BALANCE HÍDRICO DE LA CIMA DE LOS VOLCANES IRAZÚ Y TURRIALBA Y SU AFECTACIÓN A LA ACTIVIDAD HIDROTERMAL SUPERFICIAL

Presentado por:

Yemerith Alpízar Segura

Priscilla Vargas Calderón

Tesis sometida y aceptada por el tribunal examinador, como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología.

TRIBUNAL EXAMINADOR

MSc. Mario Enrique Arias Salguero
Director de tesis

MSc. Waldo Taylor Castillo
Miembro del Comité Asesor

Dr. Marco Barahona Palomo
Miembro del Comité Asesor

MSc. Ingrid Vargas Azofeifa
Lectora

Dr. Javier Trejos Zelaya
Decano de la Facultad de Ciencias

Dedicatoria

Yemerith Alpízar Segura

A mi familia por todo su apoyo, especialmente a mi hija Denisse por ser el motor que me incita a hacerle frente a las adversidades,
y no permitir que nada ni nadie me amedrente.

Priscilla Vargas Calderón

A mis padres en el cielo, al especial apoyo de mi esposo, y a mi segunda madre Doña Irma.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que en determinado momento colaboraron con la ejecución de este proyecto. En primer lugar a nuestras familias por toda la comprensión y apoyo. A los vulcanólogos Raúl Mora Amador, quien en algún momento fuera director del proyecto, por su impulso para continuar con el mismo pese a las adversidades, Gino González Ilama, Carlos José Ramírez Umaña y Dmitri Rouwet, siempre presentes brindándonos su apoyo y consejo experimentado. A nuestro director Mario Arias Salguero, por su gran apoyo y por abrirnos las puertas del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG). A los Ingenieros Luis Guillermo Loría Salazar, Oscar Valerio Salas, y demás colaboradores del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR), que nos abrieron sus puertas con gran amabilidad y nos brindaron su colaboración mediante capacitaciones para realizar los ensayos de laboratorio. A los asesores, Marco Barahona Palomo y Waldo Taylor Castillo, por su tiempo y valiosos aportes. A nuestro gran amigo, Eduardo (Lalo) Montecinos Cisternas, por su apoyo incondicional y su consejo racional. A todos los asistentes que en su debido momento nos acompañaron en el campo, Roberto Santamaría Garro, Adrián Martínez Alpízar, Fabián Valverde Jiménez, Diego Freni Méndez, Ariel Apuy Loáiciga, Adolfo García Mora, Carolina Salas Moya, y Marlen Brenes Jara. A la profesora Lolita Campos Bejarano, por sus sabias palabras cuando fueron necesarias. A los funcionarios de los Parques Nacionales Volcán Irazú y Volcán Turrialba por abrirnos sus puertas, confiar en nosotras y acompañarnos en el campo. A los funcionarios del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) por el aporte de datos. A Don Alexis Vargas, del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, por su colaboración con algunos ensayos de suelos.

ÍNDICE DE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Ubicación geográfica: 2
1.2 Objetivo general 6
1.3 Objetivos específicos 6
2. METODOLOGÍA 7
2.1 Recopilación de información 8
2.2 Trabajo de campo 9
Recolección de muestras para ensayos de laboratorio 9
Caracterización geológica superficial de ambas cimas. 11
Análisis de vegetación superficial existente 12
Ejecución de las pruebas de infiltración. 12
Mediciones de temperatura en campos fumarólicos 12
2.3 Procesamiento de muestras en laboratorios. 12
Ensayos geotécnicos, granulometría, límites y densidad aparente 12
3. CONTEXTO VULCANOLÓGICO, TECTÓNICO Y GEOLÓGICO 13
3.1 Origen y geología de los volcanes Irazú y Turrialba 13
3.2 Características geológicas regionales volcán Irazú y volcán Turrialba 15
3.2.1 Volcán Irazú 15
Estructuras tectónicas del volcán Irazú: 17
Actividades eruptivas del volcán Irazú 21
3.2.2 Volcán Turrialba 21
Estructuras tectónicas del volcán Turrialba: 24
Actividades eruptivas del volcán Turrialba. 28
Erupciones recientes 31

3.3 Unidades geológicas locales de los volcanes Irazú y Turrialba 37
a. Volcán Irazú 37
Lavas, tobas y piroclástos de 1723 y anteriores. 37
Depósitos volcaniclasticos 1963-1965 37
Depósitos Lacustres..... 38
Depósitos de Talud. 38
b. Volcán Turrialba..... 42
Descripción geológica superficial de la cima del volcán Turrialba 42
Coladas de lava 42
Depósitos piroclásticos 42
Oleadas piroclásticas 42
Depósitos piroclásticos de caída..... 45
Cenizas depositadas durante las erupciones de octubre-noviembre de 2014. 46
Depósitos lacustres..... 46
4. LAGUNAS CRATÉRICAS 47
4.1 Volcán Irazú 47
Aplicación de método fotográfico para estimar las áreas de la laguna en diferentes momentos..... 48
4.2 Volcán Turrialba 49
5. BALANCE HÍDRICO..... 52
5.1 Volcán Irazú 54
5.1.1 Parámetros disponibles 54
a. Áreas definidas 54
b. Precipitación y temperatura de cuencas. 56

c. Vegetación de cuencas 61
d. Infiltración 62
e. Pendientes 65
f. Capacidad de campo y punto de marchitez 67
g. Evapotranspiración 70
h. Densidad 70
i. Comportamiento granulométrico de los materiales geológicos superficiales en la cima del volcán Irazú. 71
j. Descripción de los depósitos volcánicos Irazú: 75
k. Salida de agua del sistema en forma de vapor 76
5.1.2 Resultados del balance hídrico en el volcán Irazú 76
5.2 Volcán Turrialba 83
5.2.1 Parámetros disponibles 83
a. Áreas definidas 83
b. Precipitación y temperatura de cuencas. 85
c. Vegetación de cuencas 89
d. Infiltración 91
e. Pendientes 96
f. Capacidad de campo y punto de marchitez 98
g. Evapotranspiración 98
h. Densidad 99
i. Comportamiento granulométrico de los materiales geológicos superficiales en la cima del volcán Turrialba. 100
j. Descripción de los depósitos volcánicos Turrialba: 104

k. Salida de agua del sistema en forma de vapor 105

5.2.2 Resultados balance hídrico en el volcán Turrialba 106

6. ACTIVIDAD HIDROTERMAL 113

6.1 Antecedentes 113

6.2 Sistemas hidrotermales 114

6.2.1 Sistema hidrotermal del volcán Turrialba 114

Campos fumarólicos: 114

Flujos de azufre 119

6.2.2 Sistema hidrotermal del volcán Irazú 119

Campos fumarólicos 120

6.3 Discusión de resultados 121

7. CONCLUSIONES, LIMITANTES Y RECOMENDACIONES 126

8. REFERENCIAS 132

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las áreas de estudio, correspondiente con las cimas de los volcanes Turrialba e Irazú. 3

Figura 2. Cuencas definidas para el desarrollo del balance en la cima del volcán Irazú. 4

Figura 3. Cuencas definidas para el desarrollo del balance en la cima del volcán Turrialba. 5

Figura 4. Diagrama de la metodología seguida en la investigación. 8

Figura 5. Recipientes utilizados en la recopilación de las muestras utilizadas para determinación de capacidad de campo y punto de marchitez. 9

Figura 6. Ubicación de los muestreos granulométricos en la cima del volcán Irazú. 10

Figura 7. Ubicación de los muestreos granulométricos en la cima del volcán Turrialba. 11

Figura 8. Ubicación del área proyecto dentro del contexto tectónico de Costa Rica y el oeste de Panamá. 14

Figura 9. Mapa geológico regional del volcán Irazú. 19

Figura 10. Estructuras en la cima y alrededores de los volcanes Turrialba e Irazú 20

Figura 11. Mapa geológico regional del volcán Turrialba. 27

Figura 12. Esquema que muestra el estado previo a la erupción del 29 de octubre 2014 ocurrida en el volcán Turrialba.. 32

Figura 13. Erupción de las 11:40 p.m. que destruyó parte de la pared interna del cráter activo del volcán Turrialba el 29 de octubre)..... 33

Figura 14. Erupción estromboliana de las 4:00 a.m. del 30 de octubre 2014, en el volcán Turrialba..... 33

Figura 15. Sismos volcano-tectónicos ocurridos durante 2014 35

Figura 16. Sismos volcánicos ocurridos durante 2014.. 35

Figura 17. Mapa geológico de la cima del volcán Irazú, modificado de Alvarado (1993) con base en los nuevos datos recolectados. 39

Figura 18. Perfil geológico A-A´. 40

Figura 19. Perfil geológico B-B´. 40

Figura 20. Unidad de Depósitos volcaniclasticos sobreyaciendo a la unidad de Lavas, Tobas y Piroclastos de 1723 y anteriores. 40

Figura 21. Cráter Diego de la Haya, se puede apreciar el crecimiento de vegetación en los depósitos lacustres. 41

Figura 22. Unidades de lavas, tobas y piroclastos de 1723 y anteriores, depósitos lacustres y de talud, cráter principal. 41

Figura 23. Mapa geológico local de la cima del volcán Turrialba. 43

Figura 24. Perfil geológico A-A´. 44

Figura 25. Perfil geológico B-B´. 44

Figura 26. Unidad de lavas aflorantes en el área de estudio. 44

Figura 27. Depósitos de oleadas piroclásticas. 45

Figura 28. Depósitos piroclásticos de caída. 46

Figura 29. Área abarcada por la superficie de la laguna formada en el cráter Principal para diferentes momentos dentro del período de estudio. 49

Figura 30. Cráter Central del volcán Turrialba. Izquierda, en Agosto de 2014; Derecha, Octubre de 2014. 51

Figura 31. Pequeña laguna efímera en el cráter Noreste. 51

Figura 32. Componentes del balance hídrico. 53

Figura 33. Áreas definidas en la cima del volcán Irazú. 55

Figura 34. Registro de precipitaciones en el volcán Irazú.. 57

Figura 35. Climograma del año 2005, de la estación volcán Irazú. 58

Figura 36. Climograma del año 2014, de la estación volcán Irazú. 58

Figura 37. Mapa de precipitación para el período 2005, cima del volcán Irazú. ... 59

Figura 38. Mapa de precipitación para el período 2014, cima del volcán Irazú. ... 60

Figura 39. Distribución de la vegetación en la cima del volcán Irazú. 62

Figura 40. Mapa de ubicación de sitios de pruebas de infiltración realizadas mediante el método Turf-Tec ®..... 63

Figura 41. Mapa de velocidades de infiltración para la cima del volcán Irazú, obtenido a partir de ensayos de campo con el infiltrómetro Turf-Tec ®. 64

Figura 42. Mapa de pendientes (en %) de la cima del volcán Irazú, en los rangos requeridos para la metodología..... 66

Figura 43. Mapa de distribución espacial de la capacidad de campo (CC), en la cima del volcán Irazú. 68

Figura 44. Mapa de distribución espacial del punto de marchitez (PM), en la cima del volcán Irazú. 69

Figura 45. Clasificación de suelos en la cima del volcán Irazú según la ubicación de las muestras. 74

Figura 46. Mapa de distribución espacial de los tipos de suelo. 75

Figura 47. Zonas de recarga potencial, volcán Irazú, para ambos años 2005 y 2014. 78

Figura 48. Mapa de recarga potencial anual 2005, cima del volcán Irazú. 79

Figura 49. Porcentaje de lluvia que logró recargar durante el período 2005, en la cima del volcán Irazú. 80

Figura 50. Mapa de recarga potencial anual para el año 2014, cima del volcán Irazú. 81

Figura 51. Porcentaje de lluvia que logró recargar durante el período 2014, cima del volcán Irazú. 82

Figura 52. Áreas definidas, cima del volcán Turrialba. 84

Figura 53. Precipitaciones mensuales de la estación del volcán Turrialba, período del 2010 al 2014. 85

Figura 54. Climograma del año 2011, estación volcán Turrialba. 87

Figura 55. Climograma del año 2014, estación volcán Turrialba. 87

Figura 56. Mapa de precipitación para el período 2011, cima del volcán Turrialba. 88

Figura 57. Mapa de precipitación para el período 2014, cima del volcán Turrialba. 89

Figura 58. Vegetación Páramo en el cráter Noreste del volcán Turrialba. 90

Figura 59. Distribución de la vegetación y valor Kv asociado en la cima del volcán Turrialba. 91

Figura 60. Valores de infiltración asignados a cada una de las áreas de balance definidas para el volcán Turrialba. 94

Figura 61. Mapa de la velocidad de infiltración para la cima del volcán Turrialba. 95

Figura 62. Mapa de pendientes (en porcentaje) de la cima del volcán Turrialba y Kp asociado. 97

Figura 63. Mapa de densidad promedio de suelos en la cima del volcán Turrialba. 100

Figura 64. Clasificación de suelos en la cima del volcán Turrialba según la ubicación de las muestras. 103

Figura 65. Mapa de distribución espacial promedio de los tipos de suelo en la cima del volcán Turrialba. 104

Figura 66. Zonas de recarga en la cima del volcán Turrialba, para ambos períodos 2011 y 2014. 108

Figura 67. Mapa de recarga potencial anual para 2011, cima del volcán Turrialba. 109

Figura 68. Porcentaje de lluvia que logró recargar en la cima del volcán Turrialba durante el periodo 2011. 110

Figura 69. Mapa de recarga potencial anual para 2014, cima del volcán Turrialba. 111

Figura 70. Porcentaje de lluvia que logró recargar en la cima del volcán Turrialba durante el período 2014. 112

Figura 71. Temperaturas en fumarolas del volcán Turrialba. 116

Figura 72. Antigua pared externa noreste del cráter Suroeste. 117

Figura 73. Temperatura de las bocas intracratéricas del volcán Turrialba en el año 2014.. 118

Figura 74. Sistema magmático hidrotermal, volcán Turrialba. 118

Figura 75. Variación de temperatura en las fumarolas del volcán Irazú. 121

Figura 76. Comparación de las precipitaciones y el área abarcada por la laguna. 122

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de las áreas de estudio. 2

Cuadro 2. Principales erupciones ocurridas en el año 2014. 34

Cuadro 3. Áreas definidas, cima del volcán Irazú. 54

Cuadro 4. Valores de pendientes y Kp asociado, a la cima del Volcán Irazú en los rangos requeridos para la metodología. 65

Cuadro 5. Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM). 67

Cuadro 6. Evapotranspiración (ETP) para el volcán Irazú durante 2014. 70

Cuadro 7. Evapotranspiración (ETP) para el volcán Irazú durante 2005. 70

Cuadro 8. Densidad de los materiales, volcán Irazú. 71

Cuadro 9. Resumen del comportamiento granulométrico y características de los materiales en el volcán Irazú. 73

Cuadro 10. Recarga potencial anual por cuenca, volcán Irazú 2005. 77

Cuadro 11. Recarga potencial anual por cuenca, volcán Irazú 2014. 77

Cuadro 12. Áreas definidas, cima del volcán Turrialba. 83

Cuadro 13. Resultados de las pruebas de infiltración realizadas en la cima del volcán Irazú, utilizadas para determinar la permeabilidad del suelo en cada área delimitada en la cima del Turrialba, con base en las similitudes granulométricas. 93

Cuadro 14. Valores de pendientes y Kp asociados asignados al volcán Turrialba, en los rangos requeridos para la metodología. 96

Cuadro 15. Evapotranspiración para el volcán Turrialba, 2014. 99

Cuadro 16. Evapotranspiración para el volcán Turrialba, 2011. 99

Cuadro 17. Resumen del comportamiento granulométrico y características de los materiales en el volcán Turrialba. 102

Cuadro 18. Volumen de agua del balance anual 2011, volcán Turrialba. 107

Cuadro 19. Volumen de agua del balance anual 2014, volcán Turrialba. 107

Cuadro 20. Condiciones generales de la laguna durante el período 1991-1994. Las temperaturas mostradas son máximas. 120

Cuadro 21. Análisis de formación de lago en el volcán Irazú, las precipitaciones y las erupciones presentadas en el volcán Turrialba. 122

Cuadro 22. Diferencia entre la recarga potencial y la salida de vapor de agua, obteniendo un valor negativo, para los años 2011 y 2014 en la cima del volcán Turrialba, estimados para el área del cráter activo. 124

Cuadro 23. Comparación entre las principales características de los volcanes Irazú y Turrialba con base en los resultados obtenidos. 125

Resumen

Los sectores de análisis, correspondientes a las cimas de los volcanes Turrialba e Irazú presentan áreas y elevaciones máximas respectivamente de 672507,6 m^2 y 3340 m s.n.m y 1066650,43 m^2 y 3432 m s.n.m. Su origen se atribuye a la subducción de la placa del Coco, bajo la Caribe. Forman parte de la Cordillera Volcánica Central, y están conformados por materiales predominantemente andesíticos y basálticos. Ambos volcanes, exhiben en sus cimas tres cráteres bien definidos, y una unidad geológica superficial predominante y correspondiente con depósitos piroclásticos recientes.

El volcán Turrialba no presentaba actividad eruptiva desde el periodo 1864-1866, sin embargo su sistema hidrotermal se mantuvo despierto, intensificando su actividad en 2001, y continuó evolucionando hasta enero del 2010, cuando ocurrieron las primeras erupciones freáticas del periodo actual.

Por otro lado, la actividad eruptiva más reciente en el volcán Irazú, fue la del periodo 1963-1965, con erupciones de tipo estrombolianas y freatomagmáticas. Posteriormente el volcán entró en un periodo de relativa calma, manteniéndose con un sistema hidrotermal activo, constituido por actividad fumarólica con escasa desgasificación, y temperaturas alrededor de los 90°C.

Los balances hídricos se realizaron mediante el método de Schosinsky (2006), para lo cual se delimitaron microcuencas en las áreas de estudio, donde fueron analizadas la precipitación, la actividad hidrotermal superficial y su relación con la formación de las lagunas. Esto se llevó a cabo para cada volcán, tanto para el año 2014, como para periodos donde existiera alguna variación importante con respecto a este. Para el caso del volcán Irazú, se realizó un balance en el 2005, donde existió una laguna en el cráter principal y las lluvias eran más intensas con respecto al 2014. Mientras que para el Turrialba, se consideró el año 2011 cuando las precipitaciones fueron mayores, en relación con el 2014.

El sistema hidrotermal en el volcán Turrialba, se caracterizó por ser muy activo durante el periodo de estudio (años 2011 y 2014), esto se vio reflejado por una intensa desgasificación, lagunas efímeras, y erupciones frecuentes. Mientras que en los periodos de análisis del volcán Irazú (años 2005 y 2014), el sistema hidrotermal se mantuvo con escasa salida de gases, concentrados principalmente en campos fumarólicos de baja temperatura.

Se determinó que para los periodos analizados, en el volcán Turrialba no existió recarga potencial hacia el acuífero superficial, debido a la intensa actividad magmática e hidrotermal. Sin embargo, para el volcán Irazú, si se obtuvo una recarga potencial hacia el acuífero superficial en los dos años en que se realizó el balance. No obstante, durante el 2014, se identificó una disminución del valor de recarga con respecto a la obtenida en el año 2005. El análisis también determinó que la laguna se mantuvo durante los periodos de mayor precipitación. Pero también se observó que los periodos de mayor actividad en el volcán Turrialba, coincidieron en su mayoría con la ausencia del lago en el volcán Irazú.

Palabras Clave: *Volcán activo, Irazú, Turrialba, Balance Hídrico, Sistema Hidrotermal, Recarga Potencial*

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del territorio costarricense se encuentran más de doscientos edificios volcánicos, de los cuales, al menos cinco han presentado actividad recientemente, siendo los volcanes Irazú y Turrialba los que han causado mayores estragos en el Valle Central desde la década de 1860 (Paniagua, 2002; González *et al*., 2013 a; La Gaceta, 1864 a, b y c).

Debido a que no existe ningún estudio donde se analice la actividad hidrotermal superficial en las microcuencas que componen las cimas de estos dos volcanes, considerando los ingresos y salidas de agua y su posible relación con la formación de lagunas cratéricas, se planteó el desarrollo de un balance hídrico delimitando a estas áreas.

La actividad eruptiva reciente de estos volcanes, y su cercanía con el área más densamente poblada del país, hace que sean de gran interés en diversos contextos de investigación. De acuerdo con varios investigadores, estos volcanes presentan diversas similitudes, incluso han llegado a mencionar la posibilidad de que ambos compartan una misma base geológica y/o presentar una interconexión entre ellos (Mora *et al*., 2001; Rouwet *et al*., 2010; Kruse *et al*., 2010).

Algunos de los estudios realizados por diversos científicos en los volcanes Turrialba e Irazú, corresponden con análisis enfocados en la geoquímica de gases en campos fumarólicos, donde han detectado gases de origen magmático. Vaselli *et al*. (2010) y Galindo *et al*. (2004), han analizado isótopos y gases provenientes de ambos sistemas volcánicos, demostrando que ciertas formas isotópicas del gas CO_2 emitido en ambos, refleja un aporte de sedimentos ricos en carbonato marino, proveniente del proceso de subducción de la placa del Coco y la placa Caribe. Sin embargo ambos autores coinciden en que, estos volcanes requieren análisis periódicos de geoquímica de gases.

La presencia de lagunas cratéricas en volcanes activos, en los casos en que fortuitamente se da, sirve para filtrar el ingreso de gases ácidos hacia la atmósfera

(cuando las fumarolas son subacuáticas), paliando así los efectos de la lluvia ácida sobre la vegetación (González *et al*., 2013 g).

Debido a la complejidad de las zonas de estudio, correspondiente a la cima de dos volcanes activos, y a la naturaleza del trabajo, se planteó llevar a cabo una labor conjunta entre las geólogas Yemerith Alpízar Segura y Priscilla Vargas Calderón, las cuales se encargaron respectivamente del volcán Irazú y volcán Turrialba, procesando la información y rindiendo resultados de los datos obtenidos en el campo y la información recopilada para cumplir con los objetivos de la investigación.

1.1 Ubicación geográfica:

Las áreas de estudio comprenden las microcuencas ubicadas en las cimas de los volcanes Turrialba e Irazú, los cuales se encuentran respectivamente, en las hojas cartográficas Carrillo (3446 III) e Istarú (3445 IV), editadas por el Instituto Geográfico Nacional a escala 1:50000. En el cuadro 1 se muestran los detalles de las áreas de estudio. Administrativamente, la cima del volcán Turrialba se encuentra ubicada dentro del cantón de Turrialba (5), distrito de Santa Cruz (4), mientras que el volcán Irazú forma parte del cantón de Oreamuno (7), distrito de Santa Rosa (5), ambos en la provincia de Cartago. La figura 1 muestra el mapa de ubicación de las áreas de estudio.

Cuadro 1. Características de las áreas de estudio.

Cima del Volcán	Elevación máxima	Área	Perímetro	Hoja cartográfica
Turrialba	3340 m s.n.m.	672508 m^2	3522 m	Istarú 3445 IV
Irazú	3432 m s.n.m.	1066650 m^2	4001 m	Carrillo 3446 III

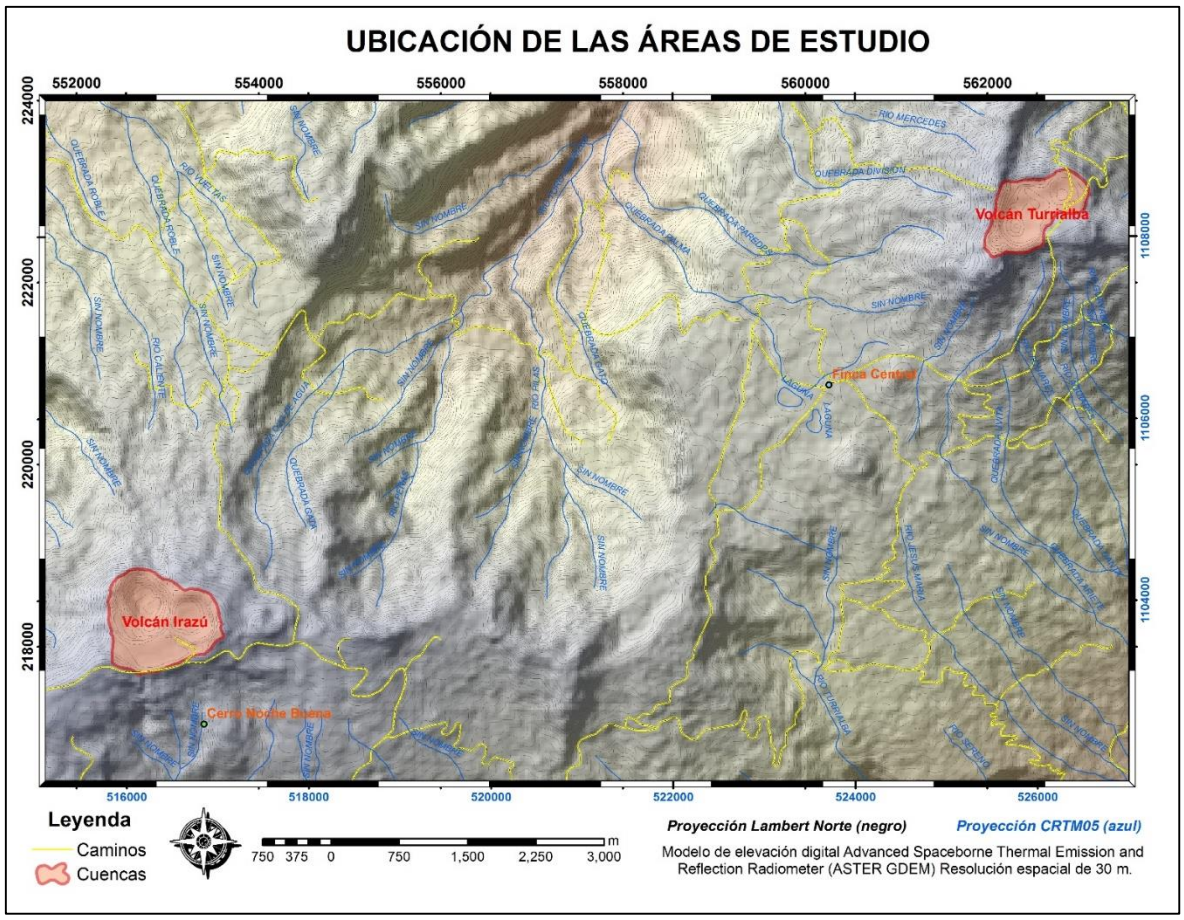


Figura 1. Ubicación de las áreas de estudio, correspondiente con las cimas de los volcanes Turrialba e Irazú.

Con base en la geomorfología de las cuencas, se determinó que el área de análisis para cada volcán se subdividiría en microcuencas, definidas a su vez por bordes de los cráteres volcánicos. Estos se caracterizan por presentar paredes divisorias y en la mayoría de los casos pendientes abruptas con bordes irregulares. En las figuras 2 y 3 se muestra la delimitación de las cuencas definidas para cada uno de los volcanes.

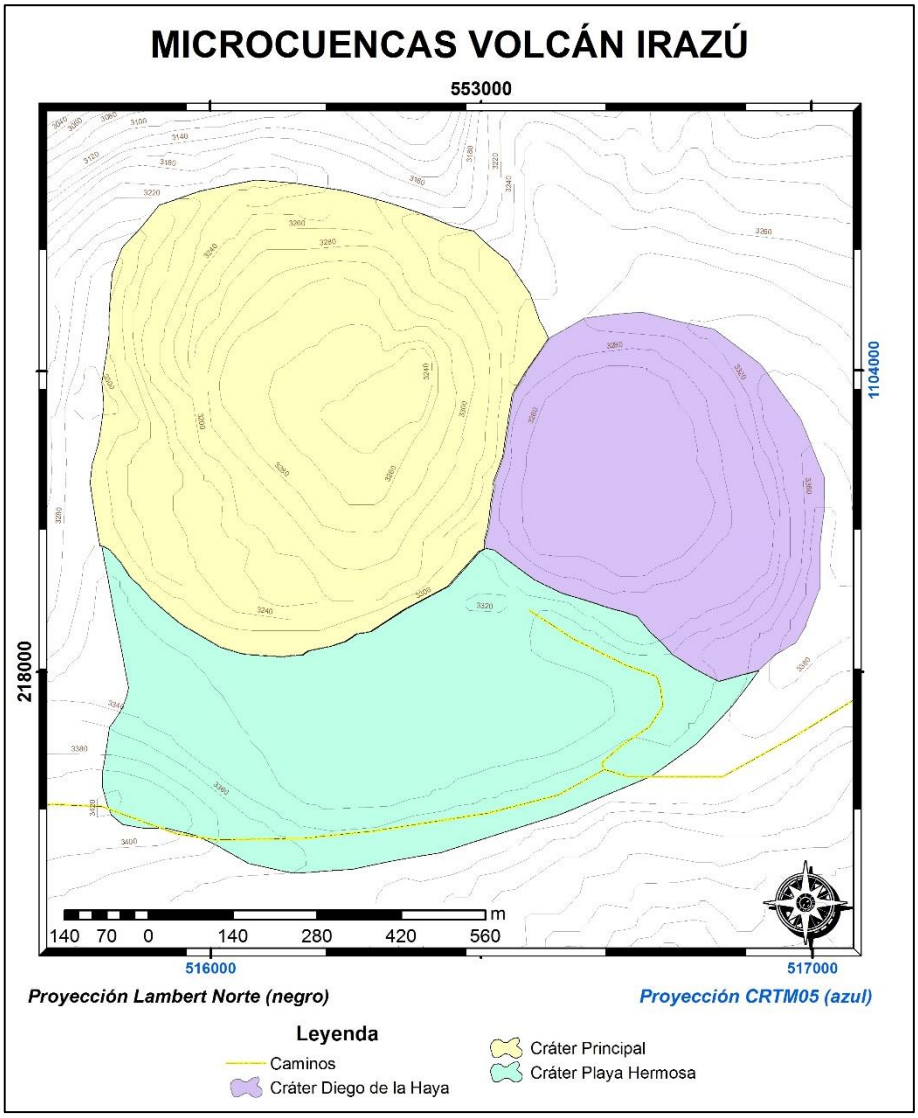


Figura 2. Cuencas definidas para el desarrollo del balance en la cima del volcán Irazú.

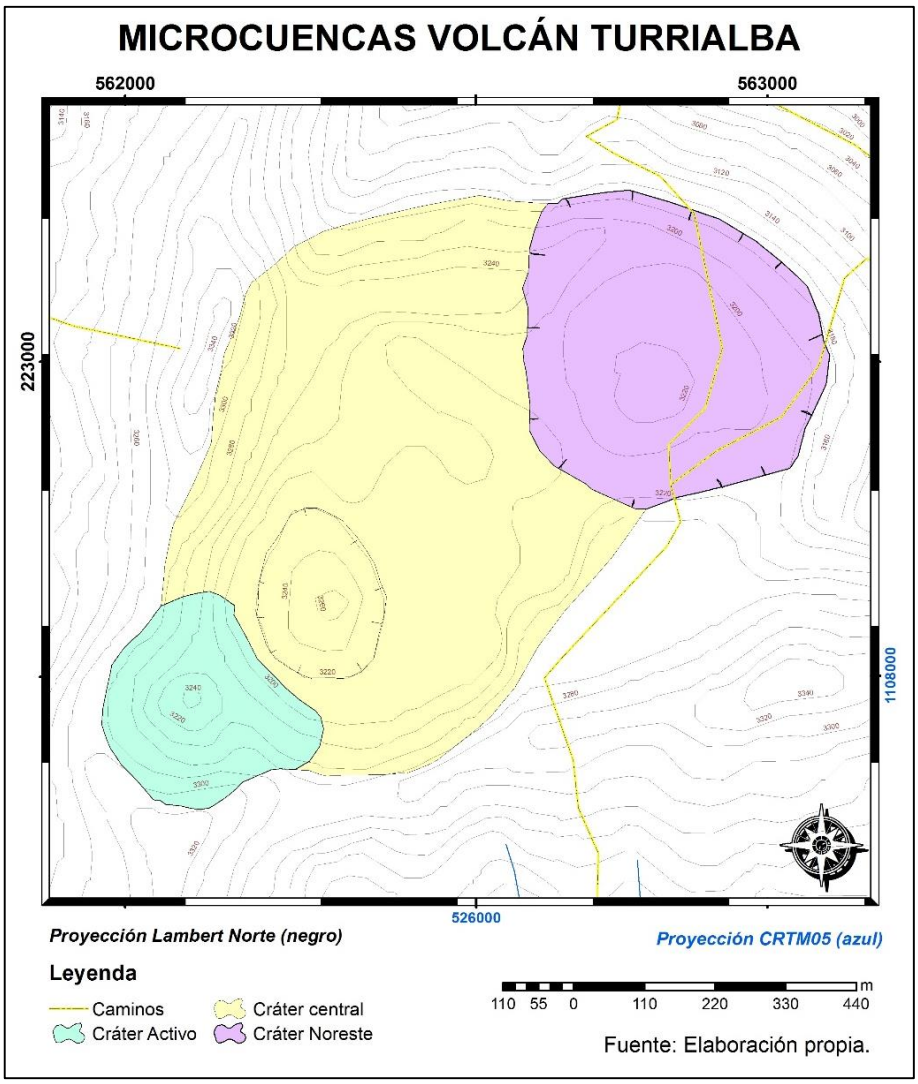


Figura 3. Cuencas definidas para el desarrollo del balance en la cima del volcán Turrialba.

1.2 Objetivo general

Determinar la relación entre la formación de las lagunas cratéricas de los volcanes Irazú y Turrialba y los períodos lluviosos, por medio de un balance hídrico y las características geológicas de esos sitios, con el fin de entender los respectivos comportamientos hidrotermales.

1.3 Objetivos específicos

a) Caracterizar geológicamente las cimas de los volcanes Irazú y Turrialba para establecer el modelo conceptual.
b) Determinar las propiedades hidráulicas de los piroclastos que cubren las cimas, para estimar las posibles zonas de recarga hacia las lagunas.
c) Realizar el balance hídrico en cada cima con el fin de conocer el volumen de agua que se infiltra y que podría estar recargando las lagunas.
d) Estudiar fotografías históricas de los cráteres para establecer volúmenes de las lagunas en diferentes momentos y compararlo con el cálculo del balance hídrico para diferentes períodos.
e) Analizar el comportamiento hidrotermal superficial de los dos volcanes, haciendo énfasis en los campos fumarólicos, lagunas cratéricas y las erupciones freáticas, así como los productos de estas, y su posible correlación con los factores que intervienen en el balance hídrico.
f) Comparar los sistemas hídricos superficiales de los volcanes Irazú y Turrialba, según el balance realizado en sus cimas.

2. METODOLOGÍA

La investigación inició con un proceso de recopilación exhaustiva de información bibliográfica, acerca de la actividad hidrotermal superficial de ambos volcanes, fotografías y datos meteorológicos. Para esto se realizó consulta de tesis, revistas científicas en formato digital e informes internos de los observatorios vulcanológicos, se visitaron las bibliotecas de la Escuela Centroamericana de Geología, Luis Demetrio Tinoco y Carlos Monge Alfaro, todas de la Universidad de Costa Rica; y el Instituto Meteorológico Nacional, donde se realizó la solicitud de información meteorológica correspondiente al período de estudio.

Posterior a la búsqueda de información, se procedió a realizar el trabajo de campo, el cual consistió en mapeo geológico, identificación y mapeo de la cobertura vegetal, recolección de muestras para los diversos ensayos de laboratorio y ejecución de pruebas de infiltración (en el volcán Irazú).

El siguiente paso consistió en el procesamiento de los datos disponibles, tanto bibliográficos como de campo, esto incluyó las pruebas de infiltración, los ensayos geotécnicos realizados a las muestras, el análisis de las fotografías históricas disponibles, elaboración de mapas de pendientes y cobertura vegetal, entre otros procedimientos. Lo anterior dio paso a la última etapa de la investigación, la cual consistió en el análisis de la información disponible, la realización del balance hídrico y la redacción del informe.

La metodología aplicada para determinar si existe alguna relación entre la formación de las lagunas cratéricas de los volcanes Irazú y Turrialba y los períodos lluviosos, se resume en la figura 4.

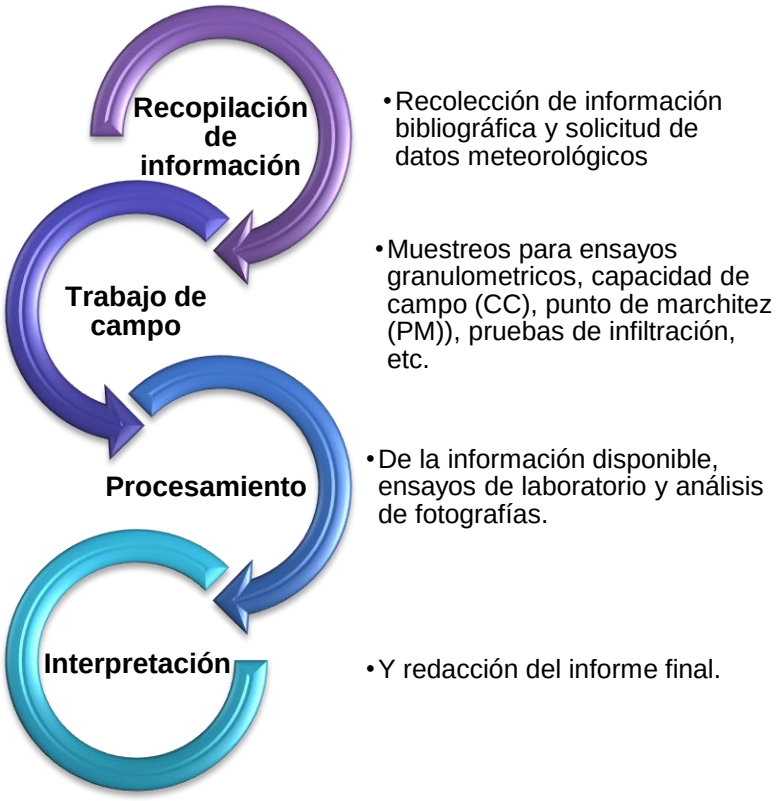


Figura 4. Diagrama de la metodología seguida en la investigación.

2.1 Recopilación de información

La recopilación de información bibliográfica se realizó mediante revistas científicas, tesis de grado y posgrado, informes internos y libros de texto. Los valores de precipitación y temperatura media mensual, fueron solicitados al Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Para el volcán Irazú se contó con datos del período 2005-2014, mientras que para el Turrialba, el registro disponible abarcó desde 2010 hasta 2014.

2.2 Trabajo de campo

Recolección de muestras para ensayos de laboratorio

Este proceso correspondió con la recolección de muestras para los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente.

Para la recuperación de las muestras destinadas a los análisis granulométricos (que no necesariamente debían ser inalteradas), se procedió a la eliminación de la cubierta vegetal superficial, en los casos donde se presentaba la misma, posteriormente, se procedió a extraer el material hasta una profundidad máxima de diez centímetros, depositando finalmente las muestras en bolsas etiquetadas para su posterior identificación. La ubicación de los sitios en donde se recolectaron las muestras para cada volcán, se presentan en las figuras 6 y 7.

Los ensayos para determinar los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM), fueron realizados en los laboratorios del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Estos ensayos requirieron de muestras inalteradas, recolectadas en recipientes de PVC (Figura 5).

Figura 5. Recipientes utilizados en la recopilación de las muestras utilizadas para determinación de capacidad de campo y punto de marchitez.

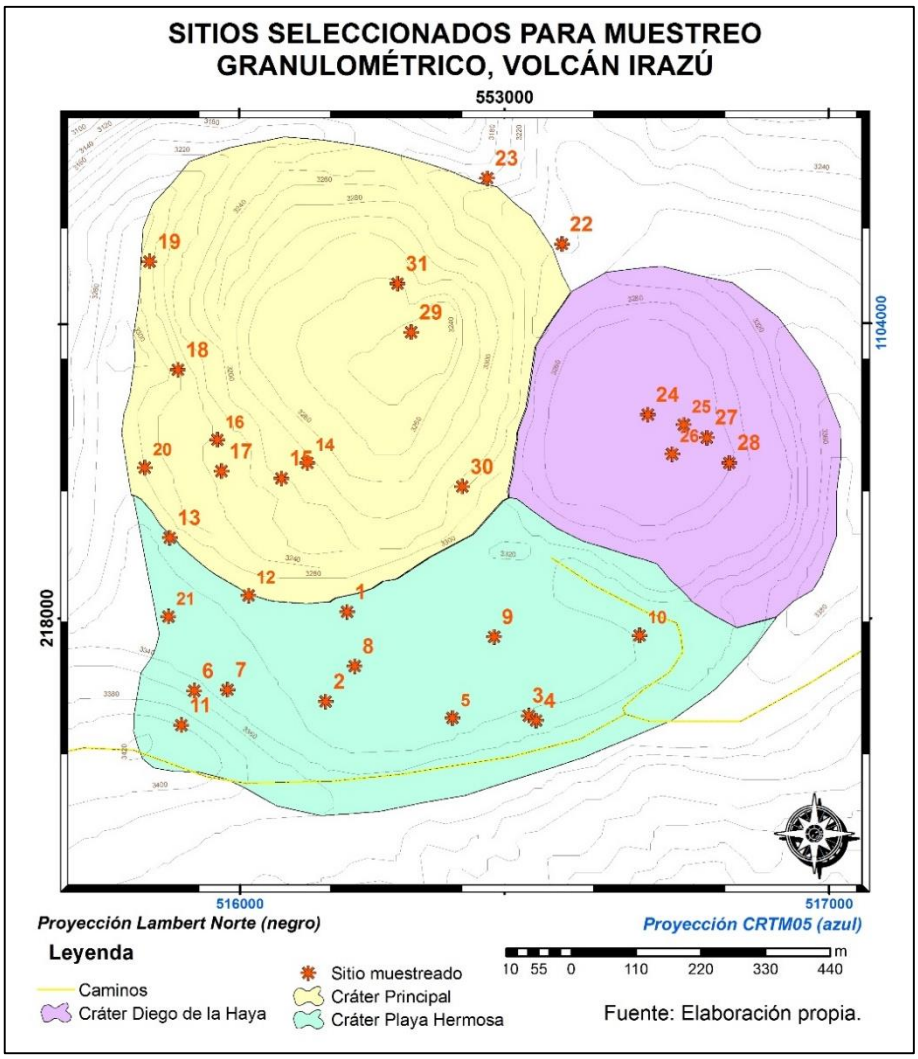


Figura 6. Ubicación de los muestreos granulométricos en la cima del volcán Irazú. .

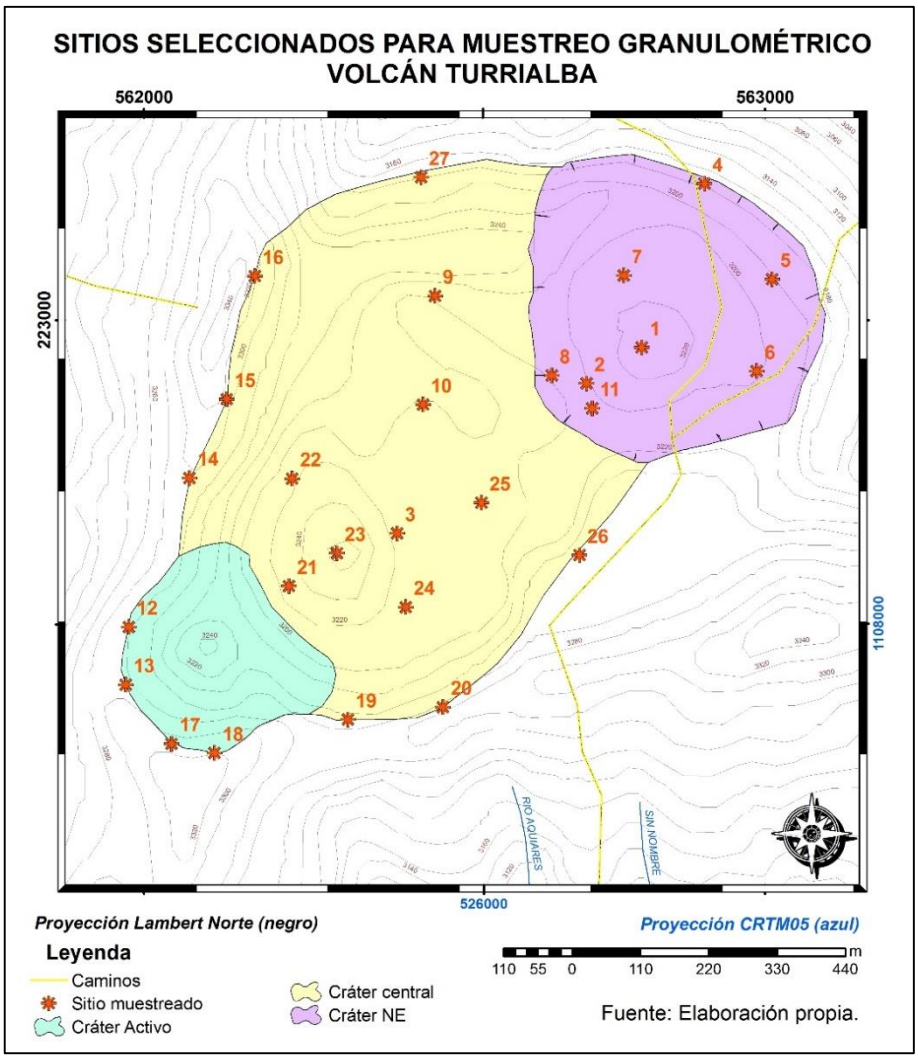


Figura 7. Ubicación de los muestreos granulométricos en la cima del volcán Turrialba.

Caracterización geológica superficial de ambas cimas.

Para la caracterización geológica superficial del área de estudio, se procedió al recorrido de las zonas accesibles donde se presentaran afloramientos importantes para la descripción y definición de las unidades geológicas superficiales.

Análisis de vegetación superficial existente

Con el objetivo de determinar la extensión de la vegetación dentro de las áreas de estudio, se realizaron toma de puntos de control mediante GPS de algunas de las zonas accesibles, además se analizaron fotografías e imágenes satelitales y con esto se delimitaron los sectores cubiertos con vegetación.

Ejecución de las pruebas de infiltración.

Para la ejecución de las pruebas de infiltración se utilizó el Infiltrómetro Turf-Tec®, herramienta que determinó el valor de la permeabilidad del suelo. La descripción del procedimiento seguido para determinar la capacidad de infiltración del terreno se encuentra en el Anexo 1.

Mediciones de temperatura en campos fumarólicos

Se procedió a recolectar datos de temperatura en los campos fumarólicos, por metodos directos (termómetro), e indirectos (cámara termografica FLIR®, facilitada por la empresa Termogram Costa Rica).

2.3 Procesamiento de muestras en laboratorios.

Ensayos geotécnicos, granulometría, límites y densidad aparente

Los análisis geotécnicos, se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR) apegados a las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) D422-63 y D421-58, además se siguieron las recomendaciones brindadas por profesionales del lugar a través de capacitaciones recibidas. El procedimiento que se siguió durante estos ensayos, se describieron en el Anexo 2.

3. CONTEXTO VULCANOLÓGICO, TECTÓNICO Y GEOLÓGICO

3.1 Origen y geología de los volcanes Irazú y Turrialba

Los volcanes Irazú y Turrialba, son estratovolcanes complejos ubicados en la región central de Costa Rica, y dentro de la zona más oriental de una parte del arco magmático conocida como la Cordillera Volcánica Central. Su origen se debe a la subducción de la placa del Coco bajo la Caribe (Carr, 1984; Carr *et al*., 2003). Esta subducción sumada al proceso de colisión de la cordillera submarina conocida como el levantamiento oceánico del Coco, es precisamente la responsable de la indentación tectónica (Kolarsky *et al*., 1995), que trajo consigo el desarrollo del complejo, diverso y amplio sistema de fallamiento de la región central del país, conocido como el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (Marshall *et al*., 2000), el contexto tectónico regional, de acuerdo con Morell *et al*. (2012) se ilustra en la figura 8. Desde el punto de vista tectónico, Costa Rica tiene una localización compleja, esto se debe principalmente, a que en el sector suroeste de su territorio se da la interacción de la placa Caribe y la Micro Placa de Panamá (sobre las cuales se sitúa el territorio costarricense) con la placa del Coco (Linkimer, 2003). Esta última se subduce a lo largo de la margen Pacífica, y en el sureste del territorio colisiona con la placa de Nazca, dando origen a un punto triple, que es donde finaliza la fosa mesoamericana. Este proceso es el responsable del intenso vulcanismo que dio origen al Arco Volcánico de Costa Rica, conformado por cordilleras de rumbo NW-SE, correspondientes a la Cordillera Volcánica de Guanacaste (CVG) y la Cordillera Volcánica Central (CVC), esta última originada entre el Pleistoceno Superior y el Holoceno (Marshall, 2000), y conformada principalmente por los estratovolcanes Platanar, Porvenir, Poás, Barva, Irazú y Turrialba (Alvarado, 2009). De estos volcanes, los que se han mantenido históricamente activos son el Turrialba, el Irazú y el Poás, cabe destacar que los dos últimos se encuentran reconocidos dentro de los cien volcanes más activos y conocidos a nivel mundial (Alvarado, 2009).

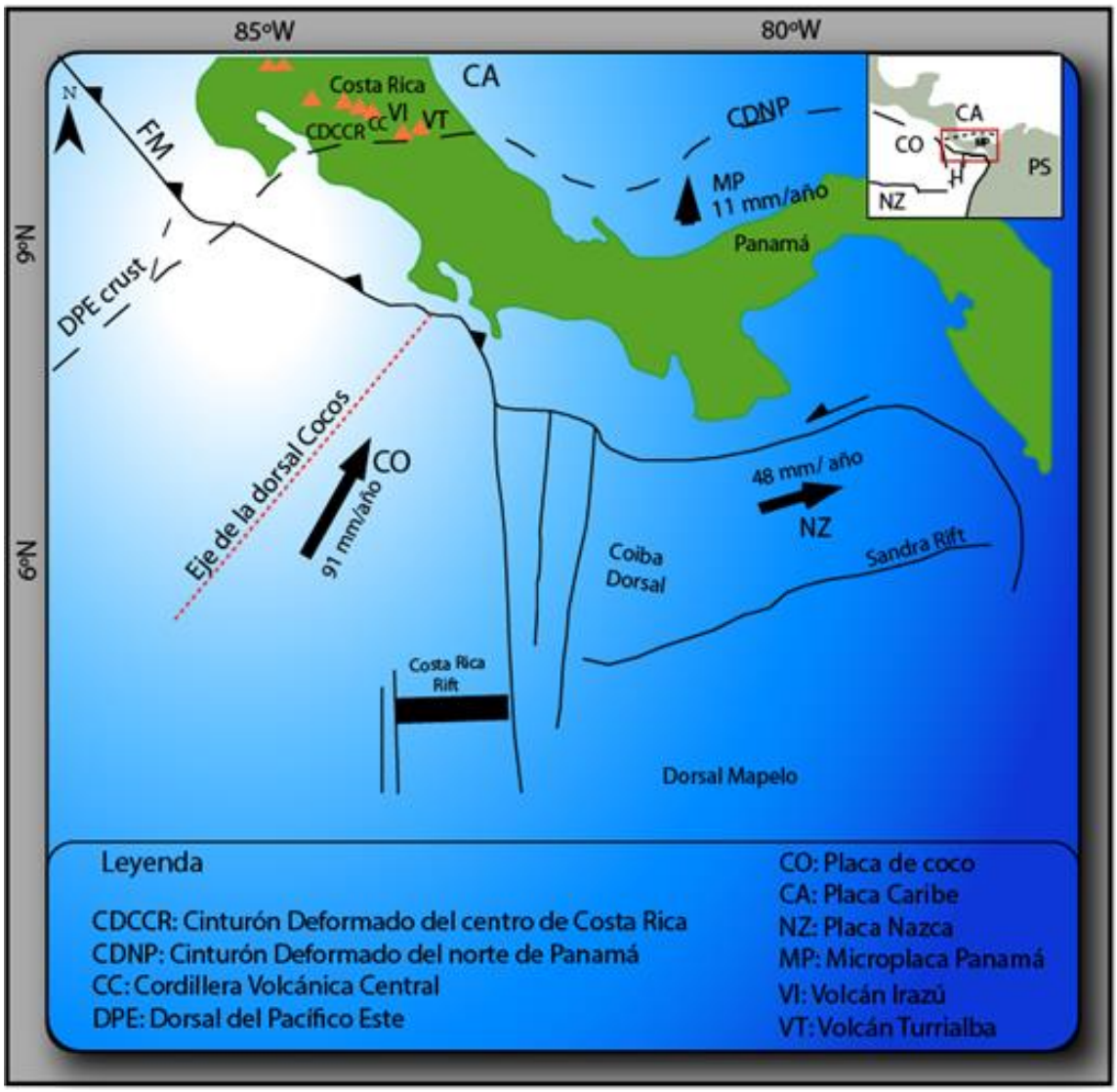


Figura 8. Ubicación del área proyecto dentro del contexto tectónico de Costa Rica y el oeste de Panamá. (Modificado de Morell *et al*., 2012).

Los productos recientes de todos estos volcanes presentan una composición mineralógica muy similar, que consisten principalmente en andesitas basálticas y andesitas (Kussmaul *et al*., 1994).

Tectónicamente, la Cordillera Volcánica Central, se encuentra afectada por un complejo sistema de fallas, conocido como Cinturón Deformado del Centro de

Costa Rica (CDCCR), ubicado principalmente en la parte central del territorio costarricense, y específicamente entre la fosa Mesoamericana y el Cinturón Deformado del norte de Panamá. Es un sistema de fallas reciente, difuso, ancho y transversal a la región Central (Montero, 2001). Con respecto a este sistema de fracturas, los volcanes Turrialba e Irazú se ubican en el extremo oriental del mismo, y se encuentran afectados principalmente por el sistema de fallas Atirro-Río Sucio, el cual ha sido asociado con el origen de los volcanes Turrialba e Irazú (Montero, 2003).

Una de las propuestas que explica el origen de los volcanes Turrialba e Irazú ha sido la de Montero (2003), donde se menciona que ambos volcanes conforman una cuenca de tracción, generada por un salto a la derecha de las fallas Atirro Tucurrique (fallas dextrales de rumbo noroeste), la cual continúa con la falla río Sucio del lado noroeste del volcán Irazú, lo cual provocó transtensión y con esto el desarrollo de la cuenca de tracción o *pull-apart*.

Las cimas de ambos volcanes actualmente se encuentran afectadas por un sistema de fallamiento denominado por Linkimer (2003) como “Fallamiento en la cima de los volcanes Irazú y Turrialba”, dentro del cual, la falla Irazú afecta al volcán Irazú, mientras que las fallas Ariete, Elia, y Dos Novillos, son las principales fallas que afectan la estructura del volcán Turrialba.

3.2 Características geológicas regionales volcán Irazú y volcán Turrialba

3.2.1 Volcán Irazú

Se localiza 30 km al noreste de la ciudad de Cartago, en la Cordillera Volcánica Central. Es un estratovolcán complejo cuya elevación máxima es de 3432 m s.n.m. Este es el edificio volcánico más alto de Costa Rica; posee tres cráteres en su cima, siendo el cráter activo el foco eruptivo del último siglo, y en el que durante algunos períodos ha albergado una laguna de propiedades físicas cambiantes, desapareciendo completamente desde enero de 2013. Al este de éste cráter se encuentra otro cráter llamado “Diego de la Haya Fernández”, en el cual se

dieron las erupciones de 1723, mientras que al sur del mismo se localiza el cráter Playa hermosa, cuyo origen según Alvarado (1993) no se conoce con certeza.

Geológicamente, el volcán Irazú es complejo (Figura 9), sus depósitos están conformados por una serie de coladas de lava (andesitas, andesitas basálticas y basaltos) alternadas con rocas piroclásticas y depósitos de lahares. Alvarado & Schmincke (2014), indican que no existe un registro de erupciones plinianas para el volcán Irazú, pero en su cima abundan los depósitos de caída y oleadas piroclásticas.

Son notables los depósitos correspondientes a las erupciones estrombolianas acaecidas durante el año de 1723 (Tristán, 1924), los cuales consisten principalmente en depósitos escoriáceos, piroclastos de caída y múltiples oleadas piroclásticas, con una composición predominantemente andesítica-basáltica (Alvarado & Schmincke, 2014).

Sobreyaciendo a los materiales depositados durante la erupción de 1723, se encuentra una secuencia tefroestratigráfica que atestigua la actividad volcánica que tuvo lugar durante el siglo pasado, la cual es descrita con detalle en Alvarado (1993).

Krushensky (1972), realizó una caracterización geológica de la hoja Istarú, abarcando al volcán Irazú, cuya cúspide se encuentra conformada por al menos tres unidades geológicas. Por su parte, Alvarado (1993), definió catorce unidades estratigráficas para todo el macizo del Irazú, cuyo rango de edades abarcaron desde el Mio-Plioceno hasta el Holoceno. Las unidades que conforman la parte superior del macizo se describen brevemente a continuación, según la caracterización realizada por Krushensky (1972) y Alvarado (1993):

1. Formación Reventado

Miembro Capa de Ceniza: Krushensky (1972) se refiere a esta unidad compuesta completamente por ceniza fina de unos 15 m de espesor, con un color característico café anaranjado oscuro a café rojizo, muy meteorizado y sin estratificación. El contacto inferior es irregular sobre el Miembro Paraíso y aunque

el contacto superior está cubierto por lahares, se determina que la unidad es claramente más antigua.

Miembro Superior: De acuerdo con Krushensky (1972), está constituida por al menos cuatro coladas de lava principales y numerosas coladas secundarias; estas rocas presentan disyunción columnar y tienen unos 30 m de espesor, además están intercaladas con algunos lahares de entre 2 m y 8 m de espesor.

Las coladas de lava del miembro superior son andesitas basálticas de color gris medio a oscuro y que meteorizan a gris claro. En los lahares, los fragmentos de roca son abundantes, su tamaño van desde arenas hasta 5 m y varían de rocas relativamente frescas, angulares y duras, a rocas arcillosas redondeadas a subredondeadas que pueden ser distinguidos de la matriz solo por el color y la textura.

2. Formación Sapper: De acuerdo con Krushensky (1972), está conformada por una serie de coladas de lava basalto andesíticas y lahares, además de capas de ceniza, todo esto se encuentra sobreyaciendo a la Formación Reventado y subyaciendo a su vez a la Formación Birrís.

3. Formación Birrís: De acuerdo con Alvarado (1993), esta formación está compuesta por un aglutinado de pequeños flujos de lava, ceniza, lapilli y depósitos brechosos producto de la actividad freatomagmática y estromboliana. Por su parte, Krushensky (1972), afirmó que se encuentra conformada por un espesor entre 50 m a 60 m de bombas y lapilli. Alvarado (1993), le asigna una edad inferior a 14000 años.

- **Estructuras tectónicas del volcán Irazú:**

Alvarado (1993), indica que los cráteres localizados en la cima se encuentran alineados con rumbo N80ºW, y que en su periferia, se localizan varias estructuras tectónicas destacables, como el cono remanente de Finca Liebres, el cual es el más antiguo conocido, desde donde se desarrollaron hacia el este algunos focos eruptivos más jóvenes. También se encuentran alineados al sur de la cima, los

cerros Noche Buena, Sapper, Retes, y Cabeza de Vaca. Sin embargo el alineamiento más notorio que se asocia con el volcán Irazú, se localiza en el flanco sur y fue llamado Falla Irazú por Linkimer (2003)

Falla Irazú

Su longitud es de al menos 6 km y tiene un rumbo aproximado N20ºE, y a lo largo de ella se alinean al menos diez conos piroclásticos, entre los que Alvarado (1993) menciona los cerros Noche Buena, Guardián, Quemados y Pasquí, así como la colada de Cervantes (figura 10).

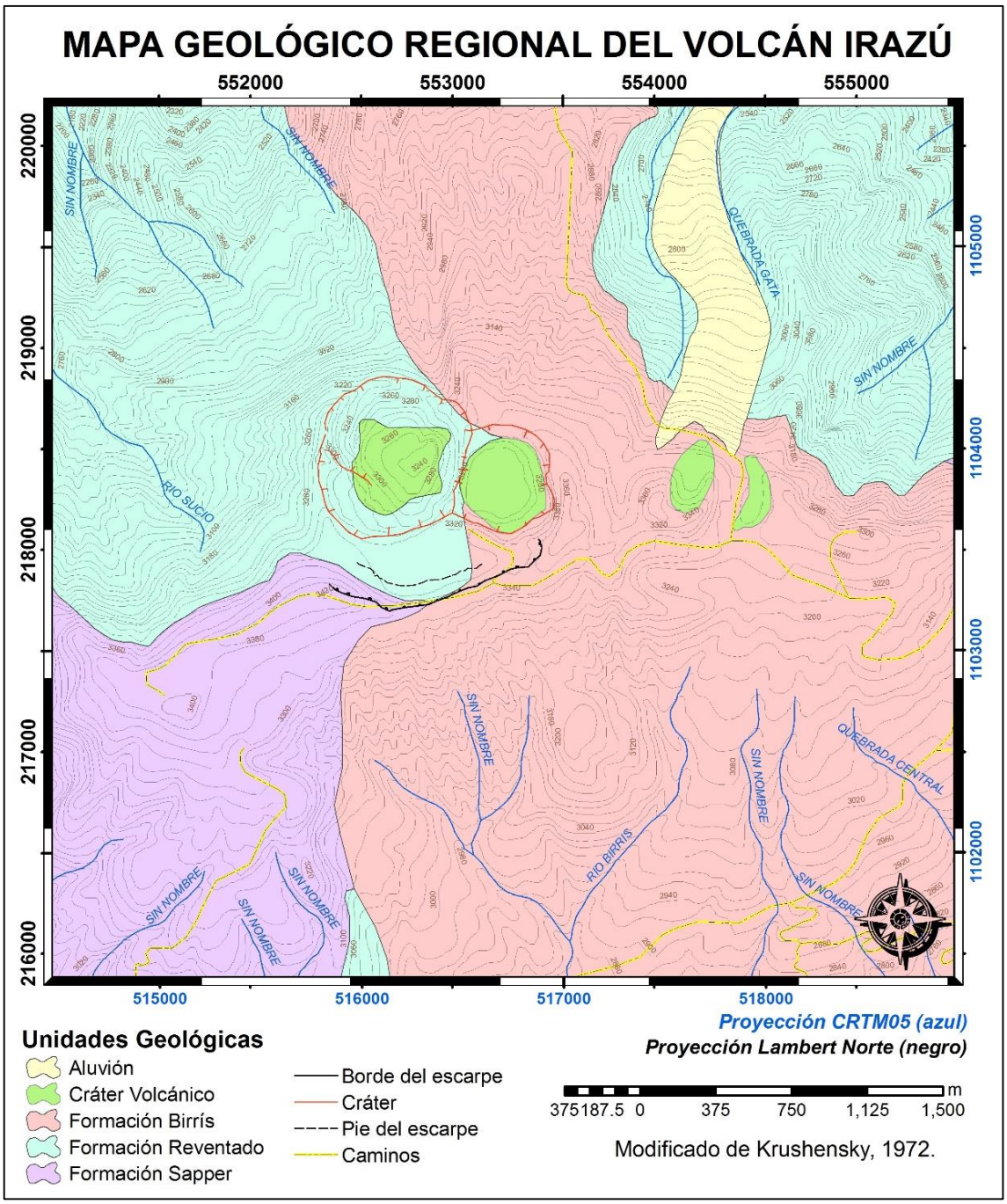


Figura 9. Mapa geológico regional del volcán Irazú. Modificado de Krushensky, 1972.

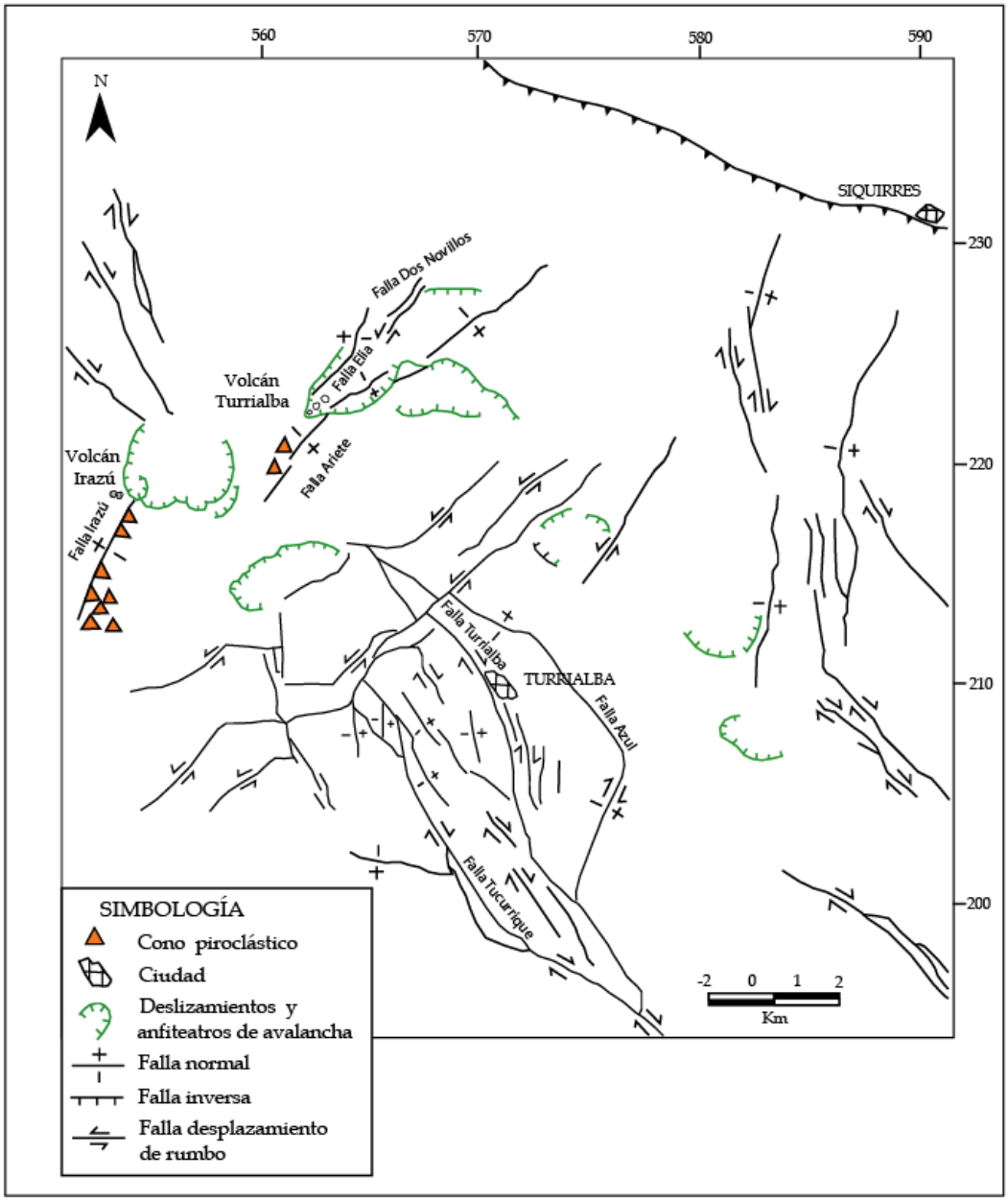


Figura 10. Estructuras en la cima y alrededores de los volcanes Turrialba e Irazú. Modificado de Linkimer (2003).

- **Actividades eruptivas del volcán Irazú**

De la actividad eruptiva de este volcán, se tiene registro histórico desde 1723, con los relatos del gobernador Diego de la Haya, en los que se describen erupciones freáticas y freatomagmáticas importantes y lo que menciona Calvo (1887), quien relata que el volcán Irazú, entonces llamado Reventado, comenzó su actividad eruptiva a las 3 de la tarde del martes 16 de febrero de 1723, con emanaciones de ceniza, truenos, sismos y caída de bloques y bombas, descritas como “cuerpos semejantes al carbón encendido”. Estos eventos continuaron hasta el 28 de febrero, con lo que se describe como “remolinos de ceniza”, que se pueden interpretar como flujos piroclásticos.

Durante el último siglo, entre 1963 y 1965 se presentó una intensa actividad eruptiva estromboliana freatomagmática procedente del cráter Principal (Alvarado, 1993), tras el cual se dio un período de relativa calma, con episodios de llenado y secado de la laguna, así como de actividad fumarólica de intensidad variable, tanto en las paredes del cráter como bajo el agua. Además se presentaron más de cien lahares producto de la confluencia entre la caída de ceniza y las fuertes precipitaciones.

Posterior a esto, y hasta la década de los 90´s, la dinámica del macizo se limitó a algunas erupciones freáticas pequeñas, pero principalmente actividad fumarólica. Durante los años 90 se presentaron únicamente algunos enjambres sísmicos. El último evento destacable de este volcán ha sido la desaparición de la laguna a inicios del año 2013, además actualmente se presentan algunas fumarolas de baja temperatura con desgasificación leve en su flanco norte (Alvarado, 2009).

3.2.2 Volcán Turrialba

Con una elevación máxima de 3340 m s.n.m. y de edad Holoceno (Vaselli *et al*., 2010), el volcán Turrialba corresponde con uno de los volcanes históricamente más activos de Costa Rica (Alvarado, 2009). Se encuentra ubicado en la parte más oriental de la Cordillera Volcánica Central y creció sobre la cuenca sedimentaria de

Limón Sur, y sobre estructuras volcánicas pliocénicas alcalinas y andesíticas (Tournon, 1984). Tiene una altura de 1900 m desde su base y un volumen aproximado de 290 km^3 (Carr, 1984). En la actualidad, este volcán posee tres cráteres bien definidos y alineados en sentido NE-SW formando una elipse, los mismos corresponden al cráter Noreste, el cráter Central y el cráter Suroeste (Reagan *et al*., 2006), de los cuales, el último también denominado cráter Murciélago permanece activo en la actualidad (Mora, 2001). Además de estos se tienen tres picos exteriores que corresponden con: cerro San Carlos al norte, cerro San Enrique al este y el cerro San Juan al suroeste (Reagan *et al*., 2006) y dos conos piroclásticos denominados como Tiendilla y el Armado (Reagan *et al*., 2006), alineados en sentido noreste debido a las tendencias estructurales de la zona según Soto (1988 a).

Los registros históricos de la actividad del volcán Turrialba, indican que se han desarrollado episodios eruptivos importantes, tanto magmáticos como freáticos (Soto*,* 2012).

Las fuentes magmáticas que han producido los materiales del volcán Turrialba, son fuentes calcoalcalinas y de intraplaca, lo cual ha generado una mezcla de magmas, siendo los piroclastos de caída, flujos y oleadas piroclásticas y avalanchas, los principales depósitos del volcán (Reagan & Gill, 1989). Las rocas, según Reagan *et al*. (2006), se caracterizan por ser basaltos, andesitas y dacitas ricas en potasio y flujos piroclásticos con pómez.

Según Soto (1988 b) y Soto (2012), este estratovolcán se encuentra formado por lavas, flujos piroclásticos no soldados, piroclastos de caída y oleadas piroclásticas. Es un edificio con armazón de lavas, pero en donde los piroclastos y epiclástos proximales son volumétricamente importantes. Las lavas analizadas de la cima y flancos son andesitas basálticas y andesitas, las cuales muestran clino y ortopiroxenos, y olivino accesorio. Son comunes las texturas glomeroporfiríticas de clinopiroxenos y ortopiroxenos, y algunos xenolítos gabroicos con clinopiroxenos,

plagioclasa y olivino. También son comunes las coronas de ortopiroxeno envolviendo los olivinos. La hornblenda es rara, y sólo se encuentra en pocas lavas opacitizada (Soto, 1988 y Soto, 2012).

Los flujos piroclásticos del cono del Turrialba son andesíticos, con líticos y bombas centimétricos a decimétricas con matrices cineríticas no soldadas. Afloran muy bien en el flanco septentrional y NE hasta distancias de 6 km de la cima (Soto, 1988 y Soto, 2012).

Se han identificado depósitos de oleadas piroclásticas hasta cerca de la lechería La Central, a 2,5 km de la cima. En la cumbre son abundantes, y se produjeron principalmente en los cráteres del noreste y el central (Soto, 1988 y Soto, 2012).

De acuerdo con los mapas geológicos de Soto (1988 b), Ruíz *et al*. (2010) y Soto, 2012), en la cima y sus alrededores, afloran al menos siete unidades geológicas, cuya distribución espacial se muestra en la figura 11.

1. **Lava Bajos 1:** Corresponden con andesitas basálticas (con dos piroxenos y olivino con coronas de ortopiroxeno), donde destacan los megacristales de hornblenda basáltica poiquilítica de hasta 25 mm. Mientras que la edad, corresponde a 62 ± 2 ka.
2. **Unidad Turrialba Inferior TU-3:** Ha sido definida mediante análisis petrográficos como andesitas con dos piroxenos y olivino accesorio. Los olivinos tienen coronas de ortopiroxenos y estos de clinopiroxenos. El análisis químico muestra una andesita básica con alto potasio. La edad correspondiente para esta unidad de 25 ± 2 ka.
3. **Lava La Silvia:** Corresponde con una lava de tipo andesítica con dos piroxenos. La edad es de 10 ± 3 ka.
4. **Lava Bajos 2:** Tiene dos subunidades: Una inferior que aflora más lejos hacia el norte del graben, y son andesitas basálticas (dos piroxenos y olivino automórfico glomeroporfirítico, con bordes de reacción). La subunidad superior la sobreyace,

y son basaltos ricos en olivino, y con más ortopiroxenos, además de tener una morfología más abrupta en bloques. Su edad es <10 ka.

5. **Lava La Picada:** Esta unidad se encuentra compuesta lavas andesíticas bipiroxénicas con olivino accesorio. La edad de la unidad corresponde con una de las coladas más recientes del volcán, con unos 3 a 6 mil años de antigüedad (± 3 ka) sobre el flanco oeste del cono.

- **Estructuras tectónicas del volcán Turrialba:**

Según Soto (1988a, 1988 b) y Soto (2012), la mayoría de las estructuras volcánicas del Turrialba se encuentran alineadas en dirección noreste. Por ejemplo se tiene: los tres principales cráteres cuspidales actuales (Figura 10), el cráter más occidental y colapsado al noroeste, los dos conos piroclásticos denominados como cerro Tiendilla y cerro El Armado y la estructura correspondiente con el anfiteatro de avalancha también denominado como caldera de avalancha o anfiteatro sectorial de colapso, y que fue interpretada en su momento como una caldera por Alvarado (1984). Además Soto (1988b), menciona las solfataras de Quebrada de Gato, los escarpes de la Quebrada Ariete y los ríos Guácimo y Elia, así como los volcanes Finca de Liebres y Dos Novillos, estructuras que también se orientan en sentido noreste.

Las formas de origen estructural más importantes que se pueden ver en los alrededores del volcán Turrialba corresponden con las fallas Elia, Ariete y Dos Novillos (Figura 10), siendo las dos primeras mencionadas las que se encuentran limitando el graben localizado en la cúspide del volcán, las cuales fueron descritas y mapeadas por Soto (1988 b). Las principales características de las fallas se detallan a continuación:

<u>Falla Ariete:</u>

La falla Ariete, conocida a su vez como falla Ariete-Río Guácimo en Montero (2003) forma parte del sistema de fallamiento existente en la cima del volcán Turrialba. Fue descrita por Linkimer (2003), como una falla de tipo normal y activa,

con un rumbo N 40° E y una longitud de 8 km. Está compuesta por tres diferentes segmentos, el más occidental se caracteriza por presentar una expresión débil, un cambio de pendiente notorio y tramos lineales en los ríos Turrialba y Jesús María de 250 y 500 m, respectivamente.

Por otro lado y de forma más prominente, se tiene el segmento central de la falla, que tiene un contraescarpe muy lineal con una altura de hasta 20 m. A lo largo de su traza se alinean la quebrada Ariete y el río Aquiares en un tramo aproximado al kilómetro de longitud. El último de los segmentos de esta falla corresponde al sector más oriental de esta falla, el cual transcurre por el valle lineal del río Guácimo, a lo largo de la base de un escarpe de 400 m de altura, que corresponde con la parte SE del gran anfiteatro de avalancha del volcán Turrialba, que se abre hacia el NE.

Falla Elia:

Al igual que la falla Ariete, la falla Elia forma parte del sistema de fallamiento en la cima del volcán Turrialba descrito por Linkimer (2003), el cual indica que es una falla de tipo normal y activa, con un rumbo N 45° E, buzando 20° al SE, una longitud de 5 km. Esta falla se encuentra ubicada en el sector norte del volcán Turrialba, y transcurre a lo largo del valle lineal de la quebrada Elia y a lo largo de la base de un escarpe lineal de 500 m de altura que forma parte de la avalancha volcánica del volcán Turrialba (Linkimer, 2003).

Fallas Dos Novillos:

La falla Dos Novillos corresponde a una falla de 2,5 km de longitud, de tipo normal con componente sinextral, y un rumbo aproximado N 40° E (Linkimer, 2003) (Figura 10), quien además indica que las trazas de esta falla consisten en lineamientos prominentes representados por los escarpes de alturas entre los 40 m y los 60 m, además se pueden identificar valles lineales e interpretar un desplazamiento sinextral en la ladera este del valle del río Guácimo (Linkimer, 2003).

Graben del volcán Turrialba:

De acuerdo con lo descrito por Soto (1988 a, 1988 b), este graben corresponde a una estructura prominente en la cima del volcán, con paredes cortadas en ángulos de 50° a 70°, en cuyo exterior localizó un depósito de avalancha volcánica que se extiende 3 km, desde la cima hacia la orientación o alineación general de la zona correspondiente al sentido noreste, sobreyacida y subyacida respectivamente por los depósitos del volcán Dos Novillos y por las coladas de lava de la unidad geológica Lavas Bajos 2 (Figura 11), indicando a su vez que el origen de la falla se debe al colapso de la pared nororiental del cono, facilitado por las zonas de debilidad identificadas y cartografiadas en Soto (1988a, 1998b) y Soto (2012), y correspondientes con las dos fallas normales que limitan al graben, denominadas como Elia y Ariete, las cuales controlan parte de la evolución y expresión morfológica del volcán Turrialba.

Soto (1988 a), considera que este graben puede extenderse hasta una longitud aproximada de 11 km. Por su parte, Linkimer (2003), indica que este graben se extiende con unas dimensiones correspondientes a 4 km de largo y 1,2 km de ancho y una orientación N40°E.

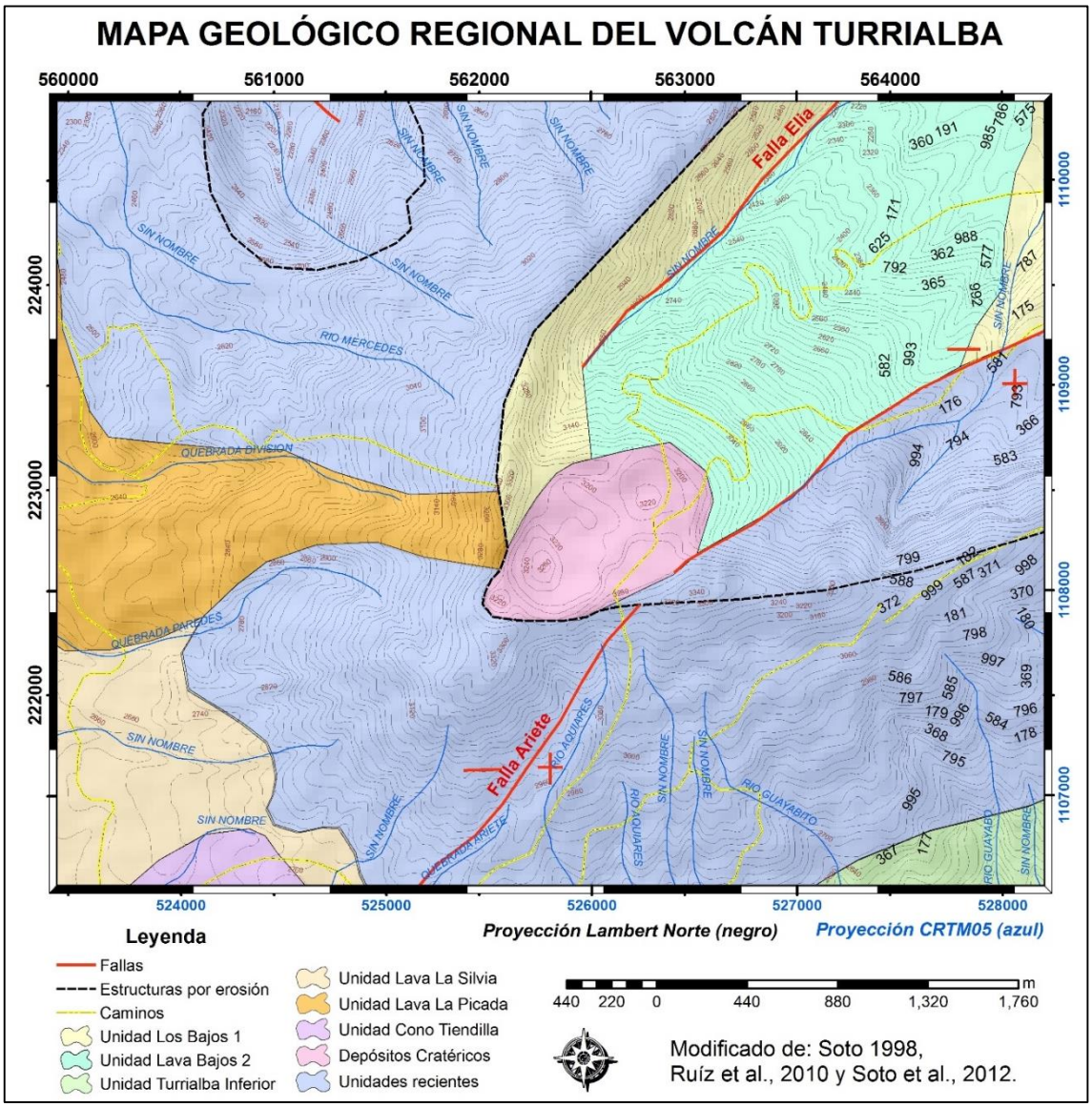


Figura 11. Mapa geológico regional del volcán Turrialba Modificado de Soto (1988 b), Soto (2012) y Ruiz et al. (2010).

Actividades eruptivas del volcán Turrialba.

El volcán Turrialba, ha hecho al menos seis erupciones en los últimos 3400 años (Reagan, 1989; Soto, 1988 a; Reagan *et al.,* 2006). Entre la información acerca de los episodios de actividad del volcán Turrialba, existen al menos dos registros históricos de erupciones importantes, correspondientes con una primera erupción magmática que se extendió en el período 1864 -1866, y la actual etapa eruptiva que inició en enero de 2010 (Seebach, 1865; González, 1910; Reagan, 1989; Soto; 1988 a; Reagan *et al., 2006 y González* et al., *2015)*

Período eruptivo 1864-1866:

Se tiene conocimiento de esta etapa eruptiva, a partir de los escritos de algunas personas que viajaban y se quedaban por un lapso de tiempo en Costa Rica; así como por las publicaciones con descripciones de la actividad del volcán y los análisis e interpretaciones documentadas por González *et al*. (2013 a) y otros autores.

En reportes consultados del Diario Oficial La Gaceta (2-10-1864; 9-10-1864), se indica que hubo afectación por caída de ceniza del 16 al 20 de setiembre de 1864, tanto en la provincia de San José como en la provincia de Alajuela, específicamente en Atenas y Grecia. Debido a las manifestaciones de actividad del volcán Turrialba, el gobierno de Costa Rica reacciona ante tal situación, enviando a dos personas, conocidos como Antolino Quesada y Manuel Guillén, a inspeccionar la cima del Turrialba (La Gaceta 9-10-1864).

Dentro de las descripciones acerca de la actividad del volcán se tiene *"…una columna de humo que se elevaba a una altura dos veces mayor que la que se alzaba en el mes de febrero",* además que la columna *"…era negra y verde y se levantaba y salía de esta torre de humo envolviendo inmensas llamaradas de fuego, azuladas, con estrépito terrible, como si la tierra quisiera producir otro volcán".* En esta misma edición de La Gaceta, quienes subieron al volcán relatan*: "…Al lado oeste del volcán*

y como a 500 varas bajo el cráter ha nacido un río, cuyas aguas son sumamente ácidas tal vez con ácido sulfúrico…".

Una de las descripciones más famosas que describe a esta erupción del volcán indica que: *"se vio arrojar mayor fuego con cuadriplicadas porciones de grandes piedras encendidas"* (Tristán, 1924). A partir de lo indicado por Sapper (1942), se interpreta que las últimas y más violentas erupciones sentidas durante esta etapa eruptiva, corresponden al año 1866.

Nueva etapa eruptiva freática 2010.

Mora *et al*. (2001), indican que la sismicidad puede relacionarse con: movimiento de fluidos hidrotermales, sismos volcano-tectónicos profundos o ruptura de roca combinado con circulación de fluidos. Previo a la erupción de 2010, se dieron algunos cambios en la actividad sismo-volcánica del volcán Turrialba. Se dio un aumento de gases en el año 2002, que provocó mayor cantidad de afectación por lluvia ácida y un incremento en las temperaturas (Mora-Amador *et al*., 2004 y Mora-Amador, 2003). Posterior a estas manifestaciones, se registraron nuevas fumarolas a temperaturas mayores a los 100 °C, acompañadas de microsismos diarios (Mora & Rojas, 2007).

En el 2009, Rojas & Peraldo (2009) mencionan la aparición de nuevas grietas con escape de gases en la fumarola del cráter principal. Hilton *et al*. (2010) y Rouwet *et al*. (2010), indicaron que en la cima del volcán, en los tres cráteres principales, aparecieron nuevas lagunas efímeras frías.

En el año 2010 comienzan las erupciones freáticas, con la formación de una boca intracratérica, denominada Boquete I-2010, del cual salía ceniza no juvenil y gases (González *et al*., 2013 a). La temperatura de este foco eruptivo, disminuyó de forma considerable en pocos meses, tal y como lo indican las mediciones y reportes realizados por Ramírez *et al*. (2011), donde manifiestan que la temperatura entre los meses de enero de 2010 y julio del 2011, pasa de 560 °C a 306 °C.

Para el año 2012 González *et al*. (2013 a), mencionan que dentro del cráter principal del volcán Turrialba se observaron cuatro flujos activos de azufre, tipo *pāhoehoe*, con *levèes* y lóbulos. Además, indican que el 12 de enero de 2012, se da una nueva erupción freática, la cual dio paso a la formación de otra boca intracratérica, la cual se denominó como Boquete I-2012, y que al igual que el Boquete I-2010, se caracterizó por presentar constantes emisiones de gases y ceniza de forma esporádica, hasta octubre de 2014, cuando se inicia la etapa eruptiva magmática (González *et al.,* 2014 h; González *et al*., 2015).

En el año 2013, se observó durante los meses de enero y febrero, una disminución en la desgasificación proveniente del boquete I-2010 y del campo fumarólico de la ladera este del cráter activo. Para entonces, se presentaba una desgasificación más intensa desde el Boquete I-2012 (Alpízar *et al*., 2013 a), pero en general, la actividad hidrotermal presentada en el volcán, se concentraba en los boquetes I-2010, I-2012 y el campo fumarólico ubicado en la pared externa sureste del cráter suroeste (Alpízar *et al*., 2013).

Para el mes de marzo, aparecieron nuevas fumarolas y los boquetes aumentaron sus dimensiones debido a la inestabilidad de las paredes (Alpízar *et al*., 2013 b). Por otra parte, la temperatura en el Boquete I- 2012 superaba los 600ºC, y por las noches se observaba incandescencia en ese punto (Alpízar *et al*., 2013 c).

A partir de ese momento, la actividad magmática-hidrotermal se mantuvo durante todo el 2013, con elevadas temperaturas, desgasificación profusa, sismos que indicaron movimiento de fluidos magmáticos y ocasionales emisiones de ceniza. En setiembre del 2013, se formó un lago efímero de agua meteórica, en el cráter central, y a su alrededor se observaron varios campos fumarólicos, uno de ellos con temperaturas superiores a 400 °C (González *et al*., 2013 c; González *et al*., 2013 d; González *et al*., 2013 e; González *et al., 2015,* Alpízar *et al*., 2013 d).

Erupciones recientes

Desde el año 1868, el volcán Turrialba no presentaba una crisis eruptiva tan importante como la ocurrida en los últimos meses del año 2014. Se estimó que este período eruptivo generado en el cráter suroeste del volcán, inició en enero del año 2010, con episodios de erupciones únicamente de tipo freáticas, en las cuales se da una disminución de presión, donde los materiales pasan de estar sometidos de presión litostática, a presión atmosférica, donde intrínsecamente se produce una implosión, expulsando materiales no juveniles mezclados con gas, vapor o agua líquida (Rouwet & Morrissey, 2014).

Durante el período de desarrollo del balance hídrico realizado en la cima del volcán Turrialba en el año 2014, no se presentaron eventos eruptivos en los meses iniciales, hasta la erupción ocurrida el 29 de octubre, que marcó el inicio de una nueva fase eruptiva magmática, que se mantuvo hasta la actualidad.

En las figuras (12, 13 y 14) se explica el comportamiento aproximado, de lo ocurrido previo y durante las erupciones del 29 y 30 de octubre de 2014, cuando se dio la salida en pequeñas cantidades de material volcánico juvenil.

El esquema de la figura 12, representa cuales eran las condiciones previas a la erupción del 29 de octubre de 2014, reflejando un sistema hidrotermal bastante activo. Además de posibles fracturas que conectan desde el interior del sistema magmático hasta la superficie, generando salida de gases característicos del mismo sistema.

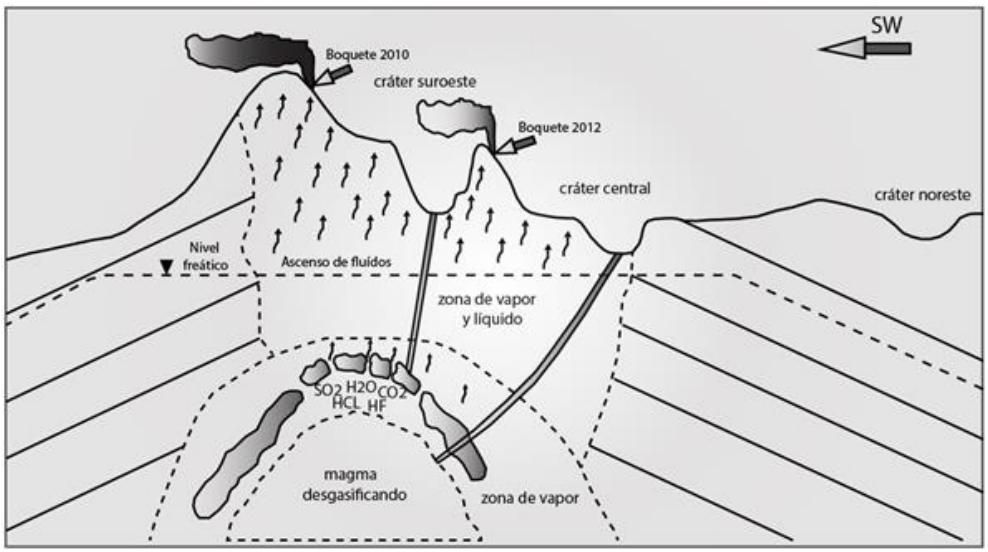


Figura 12. Esquema que muestra el estado previo a la erupción del 29 de octubre 2014 ocurrida en el volcán Turrialba. Modificado de González *et al*., 2015.

Posterior a la erupción del día 29, se da la descompresión de una parte del sistema, que genera una intensa columna de gases, y la destrucción de la pared noroeste del cráter activo (Figura 13). En la figura 14, se muestra un esquema de cómo continúa la descompresión, y se da la erupción estromboliana, con salida de material juvenil, el cual fue depositado en el sector de los cráteres Central y Noreste.

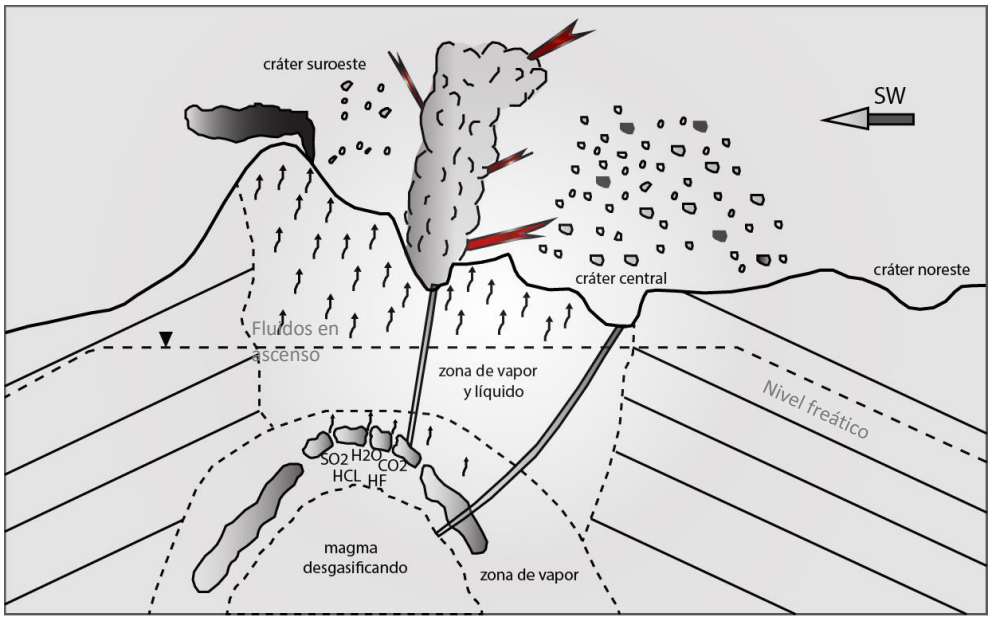


Figura 13. Erupción de las 11:40 p.m. que destruyó parte de la pared interna del cráter activo del volcán Turrialba el 29 de octubre). Modificado de González *et al.,* 2015.

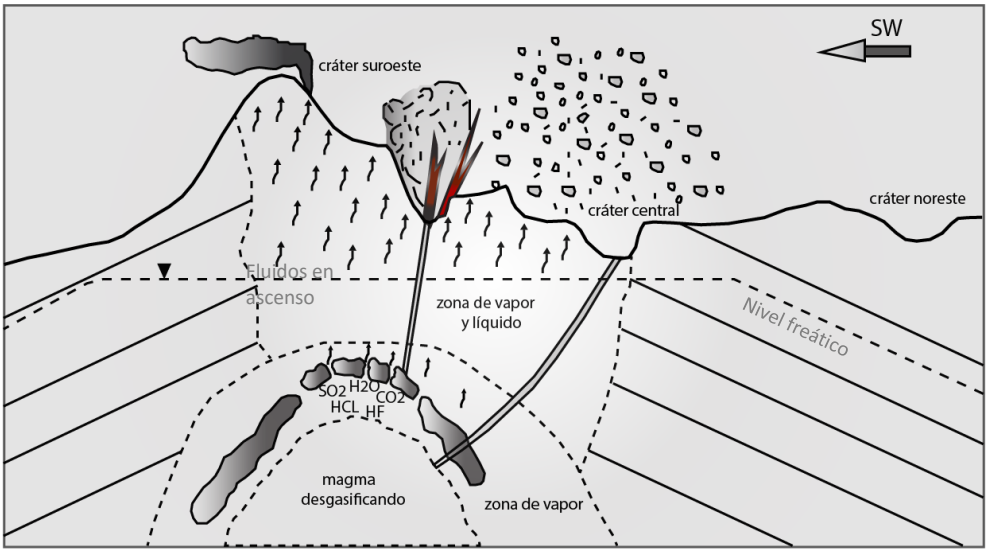


Figura 14. Erupción estromboliana de las 4:00 a.m. del 30 de octubre 2014, en el volcán Turrialba. Modificado de González *et al.,* 2015.

La etapa eruptiva se ha caracterizado por presentar períodos de erupciones intercalados con ciclos de tranquilidad. Se interpreta que durante esos lapsos de quietud, el sistema se recarga de energía para ser liberada nuevamente, en forma de salida de gases y explosiones. En el cuadro 2, se enlistan las principales erupciones ocurridas durante el año 2014 en el volcán Turrialba, y el tipo de erupción reportada.

Cuadro 2. Principales erupciones ocurridas en el año 2014.

Fecha	Hora	Erupción	Reporte
29-Oct	11:10 a.m.	Erupción freática	RSN
30-Oct	4:00 a.m.	Erupción estromboliana	RSN
	03:46 p.m.	Erupción freática	RSN
	08:10 p.m.	Erupción freática	RSN
31-Oct	02:15 a.m.	Erupción freática	RSN
	08:08 a.m.	Erupción freática	RSN
	12:37 p.m.	Erupción freática	RSN
	2:20 p.m.	Erupción freática	RSN
1-Nov	5:20 a.m.	No reporta	OVSICORI
11-Nov	No reporta	Estromboliana	OVSICORI
12-Nov	No reporta	Estromboliana	OVSICORI
13-Nov	3:40 a.m.	No reporta	OVSICORI
14-Nov	1:40 p.m.	No reporta	OVSICORI
16-Nov	No reporta	No reporta	OVSICORI
8-Nov	09:28 p.m.	No reporta	OVSICORI
8-Dic	09:30 p.m.	Estromboliana	OVSICORI
12-Dic	No reporta	No reporta	RSN

En las figuras 15 y 16 se muestran respectivamente los sismos volcano-tectónicos y volcánicos registrados por Mora-Amador *et al*. (2014), durante el año 2014. Nótese que la cantidad de sismos volcano-tectónicos generados por fallamiento activo, registrados en la estación CVTR de la Red Sismológica Nacional, comenzaron a aumentar significativamente a partir del mes de octubre coincidiendo con la actividad eruptiva reflejada en superficie, alcanzando un pico máximo en el mes de noviembre, con sesenta y nueve eventos diarios. Previo al desarrollo de las

erupciones, se tenían eventos sísmicos volcano-tectónicos por lo general menores a veinte eventos diarios (Mora-Amador *et al*., 2014).

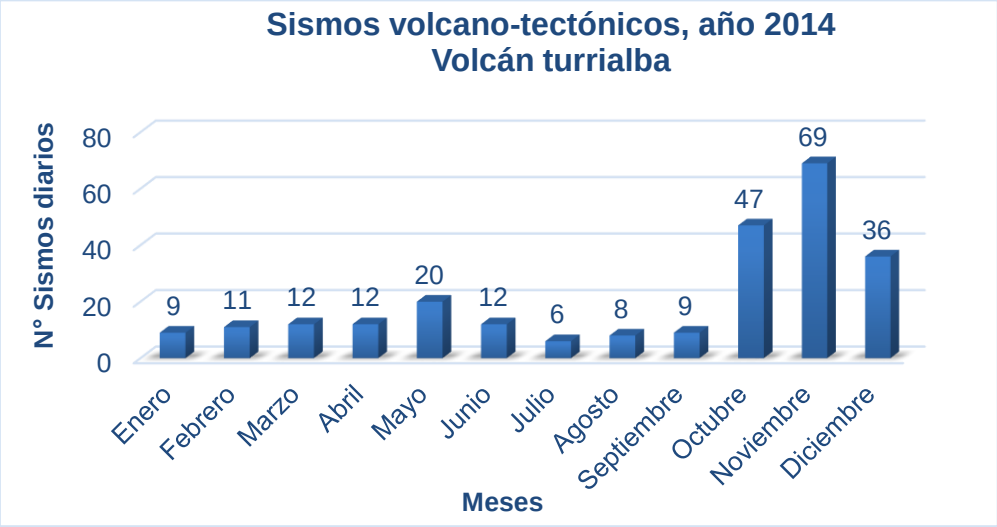


Figura 15. Sismos volcano-tectónicos ocurridos durante 2014 (Mora-Amador *et al*., 2014).

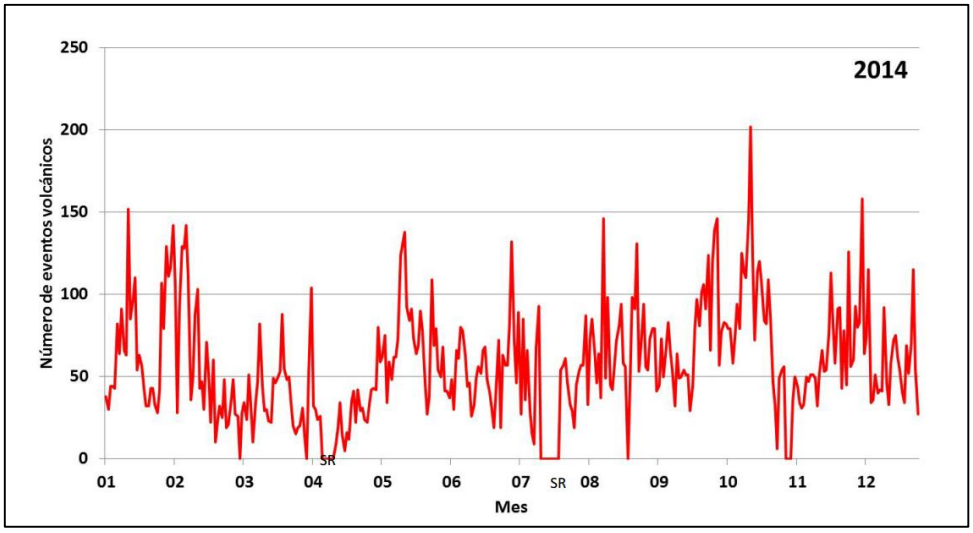


Figura 16. Sismos volcánicos ocurridos durante 2014, (Mora *et al*. 2014).

A continuación se presenta un resumen de algunas de las observaciones hechas en el volcán Turrialba, posterior a las erupciones generadas desde octubre del 2014, según Alpízar *et al.* (2014 c) y González *et al*. (2014 h; 2014i).

- Deslizamientos dentro del cráter activo y aumento de la ladera este hacia el cráter Central. Producto de fuertes lluvias, pendientes altas, alteración hidrotermal y sismos.
- Incrementos de temperatura en los campos fumarólicos y las bocas intracratéricas.
- Fumarolas de alta temperatura más expuestas en la ladera este del cráter activo, por lo cual se puede observar incandescencia en esta pared.
- Aumento de actividad volcano-tectónica en algunos periodos.
- Cráteres de impacto de hasta medio metro de profundidad, generado por bloques impactando al caer.
- Caída de bombas dentro de un radio de 800 m alrededor del cráter activo.
- Caída de ceniza en los alrededores del volcán, y en gran parte del Valle Central.
- Incandescencia en las bocas intracratéricas.
- Constante salida de gases (vapor de agua, y dióxido de azufre). En ocasiones la altura de la columna de gas podía alcanzar los 1000 m.
- Pequeños lahares (flujos de lodo) en el cauce de la quebrada Paredes. Estos flujos son disparados por las intensas lluvias sumadas a la inestabilidad de los materiales volcánicos depositados recientemente en las laderas.
- Incremento del área afectada por la lluvia acida.
- Devastación de la vegetación atacada por los gases, ceniza y balística agresiva además de evidencias de posibles “*surges*”.
- Flujos piroclásticos (limitados a la cima).

3.3 Unidades geológicas locales de los volcanes Irazú y Turrialba

a. Volcán Irazú

De manera simplificada, y según los objetivos de la investigación, en la cima del volcán Irazú se han definido cuatro unidades geológicas, la ubicación de cada una de ellas dentro del área de estudio se muestra en la figura 17. La definición de estas unidades obedece principalmente al comportamiento mecánico de los materiales, y su descripción se presenta a continuación. Como parte de la definición del modelo geológico conceptual, se elaboraron dos perfiles geológicos, los cuales corresponden a las figuras 18 y 19.

- **Lavas, tobas y piroclástos de 1723 y anteriores.**

Corresponden con todos aquellos materiales andesíticos y basálticos que datan de las erupciones de 1723 y previo a estas. Dentro de esta unidad se agrupan flujos de lava, tobas, depósitos de oleadas y flujos piroclásticos, escorias e intrusivos, los cuales fueron descritos por Alvarado (1993) y Hudnut (1983), entre otros. Estos materiales constituyen la base de la estructura volcánica, en general son los que dan origen a las altas pendientes que limitan la microcuenca y definen los cráteres, aflorando en casi toda el área de estudio. Esta unidad está sobreyacida por los depósitos volcaniclasticos del período eruptivo 1963-65, así como por los depósitos de talud y los lacustres que se han formado al secarse las lagunas efímeras de los cráteres Principal y Diego de la Haya (figuras 20, 21 y 22).

- **Depósitos volcaniclasticos 1963-1965**

Principalmente son capas de ceniza que fueron depositadas en el área del cráter Diego de la Haya, Playa Hermosa y en la pared suroeste del cráter Principal, sobreyaciendo a la unidad de Lavas, Tobas y Piroclastos (Figura 20). Su espesor puede alcanzar varios metros y está conformada por ceniza juvenil, de granulometría media a gruesa, de composición intermedia a básica.

- **Depósitos Lacustres**

Corresponden con productos remanentes, de granulometría fina, que quedan acumulados en el fondo del cráter tras secarse un lago. En este caso se trata de capas arcillosas de materiales residuales, con espesores centimétricos a decimétricos que se encuentran en el fondo de los cráteres Principal y Diego de la Haya. Estos materiales son fértiles, por lo que una vez cesada la actividad volcánica, son los primeros sitios en los que aparece vegetación (figura 21).

- **Depósitos de Talud.**

Son los materiales que se desprenden de las laderas producto de la erosión y meteorización de las unidades más antiguas, los cuales posteriormente son depositados al pie de los taludes, en forma de conos de detritos. Por su origen, su composición es heterogénea, y se distribuyen por toda el área de estudio, principalmente en los sectores de piedemonte y regiones con laderas inestables (figura 22).

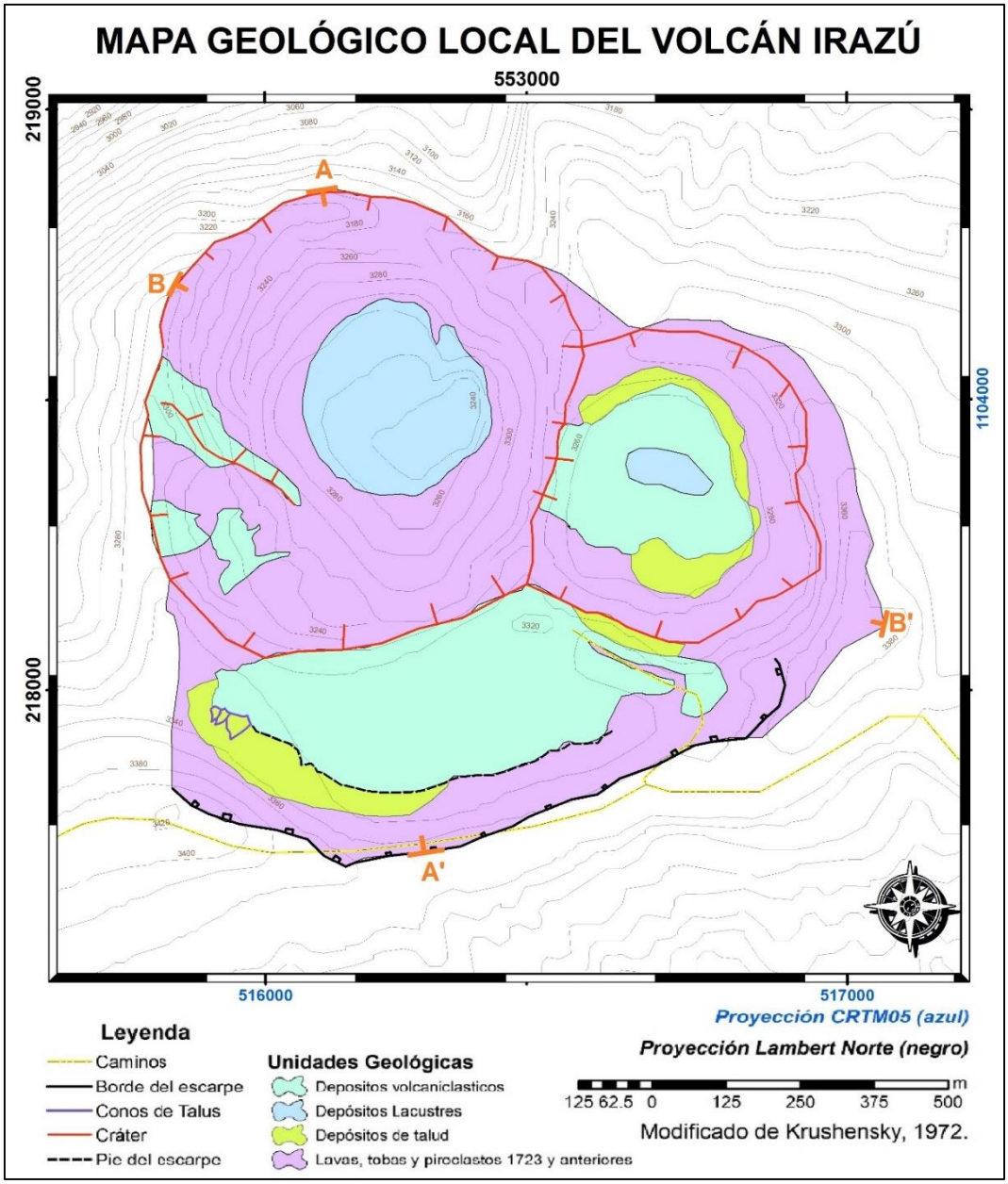


Figura 17. Mapa geológico de la cima del volcán Irazú, modificado de Alvarado (1993) con base en los nuevos datos recolectados.

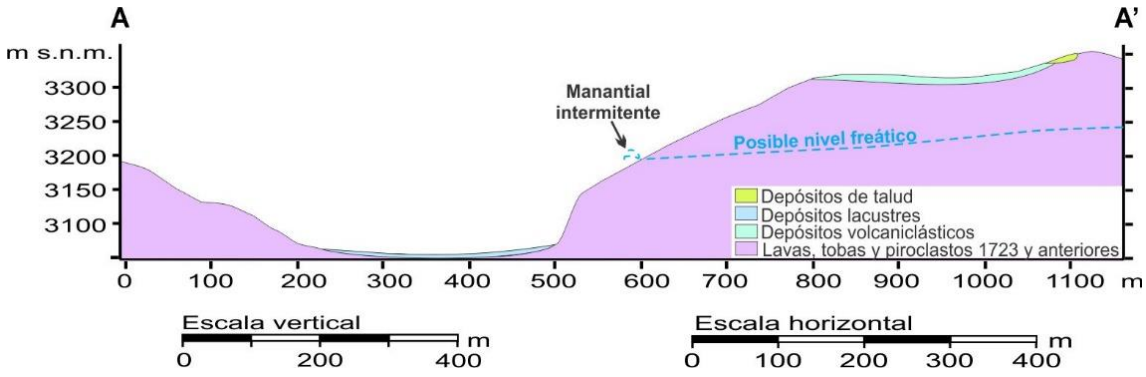


Figura 18. Perfil geológico A-A´.

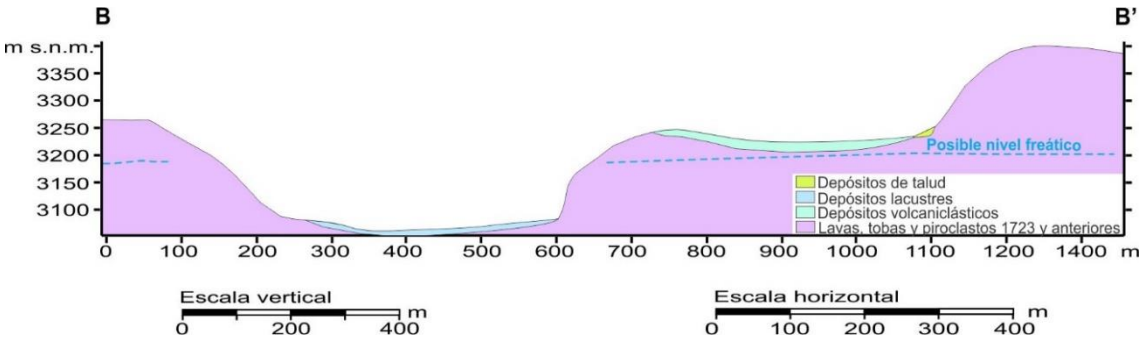


Figura 19. Perfil geológico B-B´.

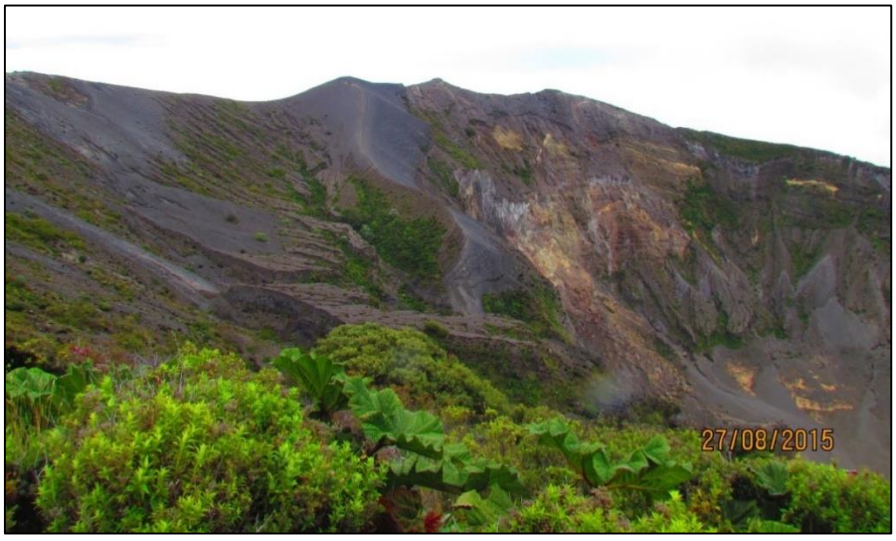


Figura 20. Unidad de Depósitos volcaniclasticos sobreyaciendo a la unidad de Lavas, Tobas y Piroclastos de 1723 y anteriores.

Figura 21. Cráter Diego de la Haya, se puede apreciar el crecimiento de vegetación en los depósitos lacustres.

Figura 22. Unidades de lavas, tobas y piroclastos de 1723 y anteriores, depósitos lacustres y de talud, cráter principal.

b. Volcán Turrialba

Para la caracterización de la geología superficial del área, se procedió al recorrido de las zonas accesibles, donde hay afloramientos importantes que permitieran describir las unidades geológicas superficiales observadas.

Descripción geológica superficial de la cima del volcán Turrialba

La cima del volcán Turrialba tiene tres unidades geológicas principales: coladas de lava, depósitos piroclásticos, y depósitos lacustres. Estas unidades se describen a continuación y su distribución se muestra en la figura 23, las figuras 24 y 25, corresponden con los perfiles geológicos trazados como parte de la definición del modelo geológico conceptual.

- **Coladas de lava**

Comúnmente se encuentran aflorando al sur de los cráteres suroeste y central, principalmente en los bordes de los mismos y en las paredes de mayor pendiente (figura 26, las mismas presentan una composición andesítica hasta andesítica basáltica.

Estas lavas afloran en la cima y flancos del volcán, han sido analizadas por Soto (2012), quien indica que estas se encuentran compuestas por clinopiroxenos, ortopiroxenos y olivino accesorio. Además señala que son comunes las texturas glomeroporfiríticas y algunos xenolítos gabroicos.

- **Depósitos piroclásticos**

  - **Oleadas piroclásticas**

Se encuentran principalmente en los sectores más elevados del volcán Turrialba (Mirador), presentan una estratificación plana, con bloques o fragmentos irregulares de andesita los cuales dejan una característica huella de impacto sobre los materiales más inconsistentes o blandos de la misma oleada (Figura 27). Se puede apreciar laminación paralela, comúnmente en los materiales más finos correspondientes a las cenizas de coloración gris a café claro.

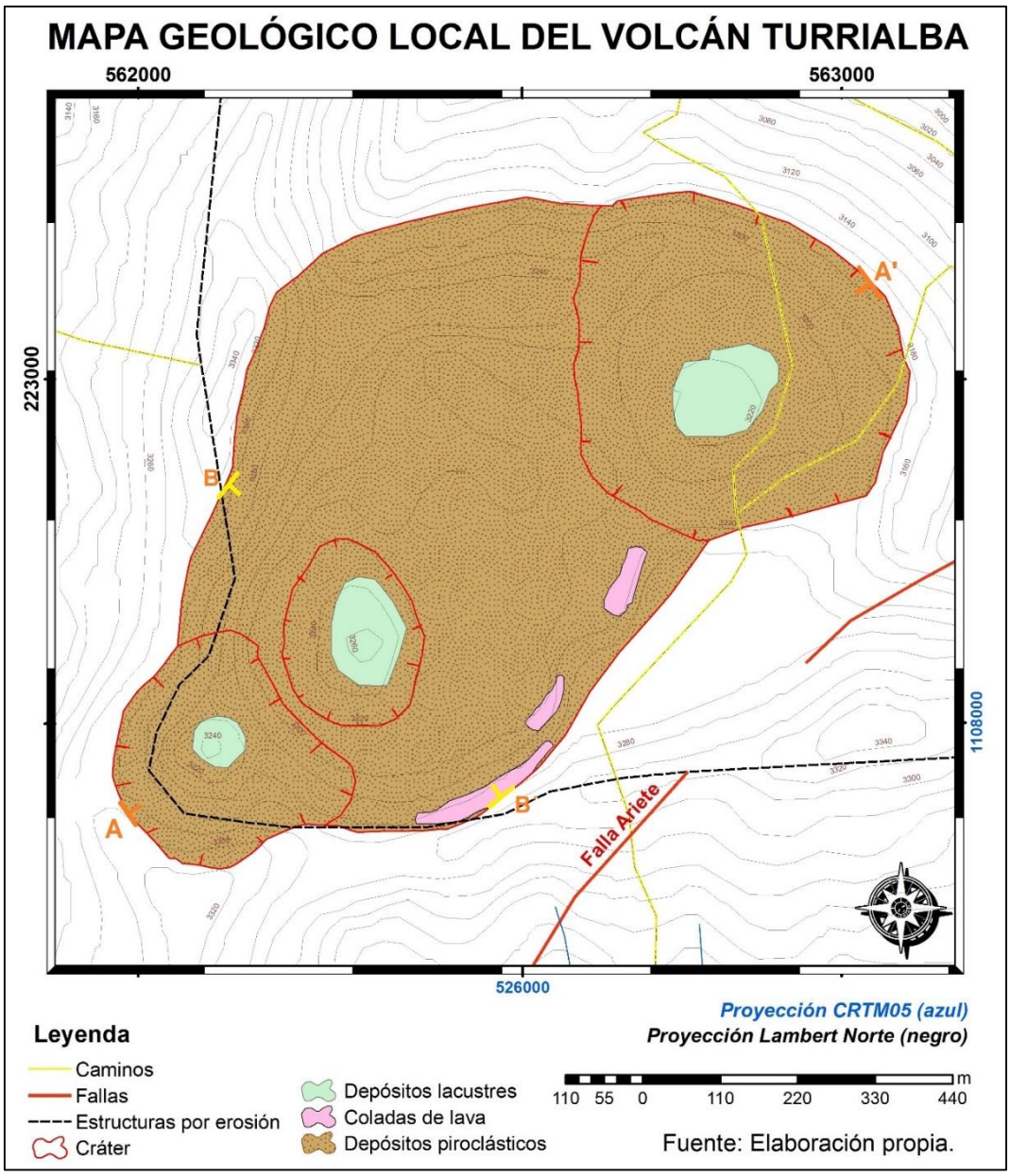


Figura 23. Mapa geológico local de la cima del volcán Turrialba.

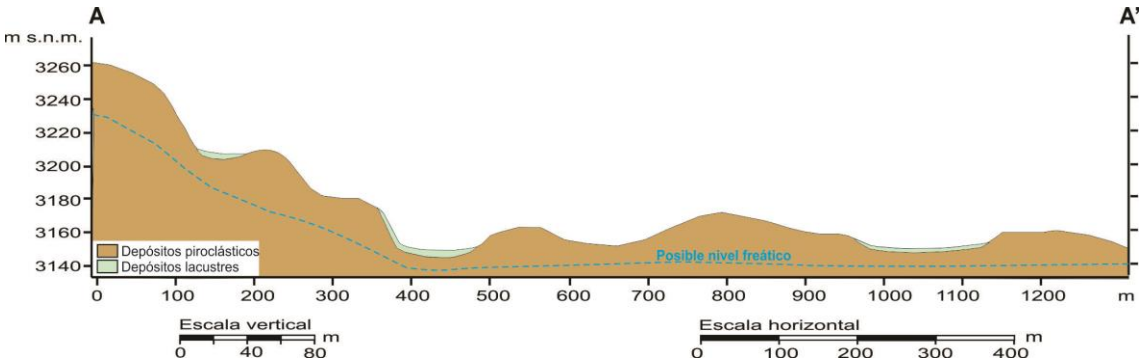


Figura 24. Perfil geológico A-A´.

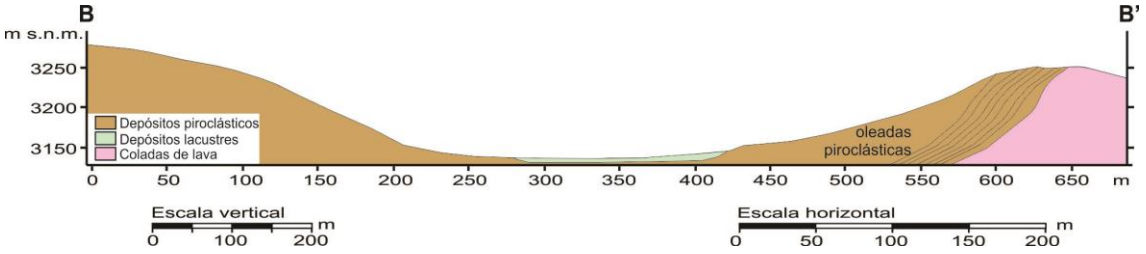


Figura 25. Perfil geológico B-B´.

Figura 26. Unidad de lavas aflorantes en el área de estudio.

Figura 27. Depósitos de oleadas piroclásticas.

- **Depósitos piroclásticos de caída**

Se encuentran compuestos predominantemente por cenizas de coloración café a gris, acompañada por lapilli de líticos de andesitas y escorias. Estos depósitos presentan comúnmente estratificación paralela con algunas alternancias de capas con variación en coloración debido al grado de alteración y cambios en la composición (figura 28). Dentro de cada capa se observa buena selección del material que las compone. En algunas sectores del área de estudio, estos depósitos se observan cubiertos por bombas o bloques de lava andesítica.

Figura 28. Depósitos piroclásticos de caída.

- **Cenizas depositadas durante las erupciones de octubre-noviembre de 2014.**

Posterior a las erupciones ocurridas en octubre de 2014, la cima del volcán Turrialba quedó cubierta por una capa de ceniza gris, con un espesor promedio de 2 m. Se procedió a realizar análisis granulométricos a estos materiales y se determinó que consisten principalmente en ceniza con predominancia de finos, los detalles de estos análisis se presentan en el Anexo 3.

- **Depósitos lacustres**

Estos materiales se encuentran principalmente en la sección central de cada cráter. Corresponden con materiales residuales, producto de la depositación laminar de sedimentos en el fondo de lagunas ahora desaparecidas. Los mismos presentan una composición andesítica y se ven representados por capas de espesores centimétricos, compuestas por limos y en menor proporción arcillas.

4. LAGUNAS CRATÉRICAS

4.1 Volcán Irazú

Durante los últimos cincuenta años, el cráter Principal del volcán Irazú ha presentado múltiples cambios, tanto en el color de su laguna, como en su volumen. Hacia el final de 1979, debido a la interacción entre los factores climáticos e hidrotermales propios del macizo, la laguna se secó completamente, reapareciendo hacia el final de 1984, cuando presentaba un color amarillo e intensos burbujeos provenientes del fondo del lago (SECCIÓN DE SISMOLOGÍA Y VULCANOLOGÍA, 1979 a; 1979 b; 1985). La laguna se seca nuevamente a mediados de 1987 (RSN, 1987) para volverse a llenar durante 1988, alcanzando niveles relativamente altos y tornándose de color verde (RSN, 1988 a; 1989).

Para 1998, el nivel de la laguna ascendió producto de las fuertes precipitaciones causadas por el huracán Mitch, incluso se llegó a reportar la presencia de un manantial efímero de agua meteórica que alimentaba el lago frío durante noviembre de 1998, que desapareció en enero de 1999 (RSN, 1998; 1999). Este manantial se observó nuevamente en 2014 y 2015.

En la década posterior (2000-2010), se presentaron varios cambios de coloración y nivel en el lago, además de la disminución de actividad en los campos fumarólicos, que desaparecieron antes de 2005 (RSN, 2000 a; 2000 b; 2001; 2002 a; 2002 b; 2003 a; 2003 b; 2003 c; 2004). El nivel de la laguna comenzó a disminuir nuevamente desde 2008, para secarse completamente en abril de 2010 (RSN, 2010); como dato importante, se considera que la influencia hidrotermal en el agua de la laguna desde 2008 fue nula (RSN, 2008; 2010).

Durante 2011 la laguna reapareció, esta vez solamente por un período de dos años, pues se secó nuevamente en enero de 2013. Además, según mediciones realizadas a través de imágenes térmicas, hasta el final del año 2014, no se presentó ningún tipo de anomalía térmica en el fondo del cráter ni en las paredes del mismo (Alpízar *et al.,* 2014 c).

Según Tassi *et al., (*2009), a inicios de la década de 2000, la profundidad del lago llegó a ser de unos 31 m. Este valor se tomó como referencia para el nivel existente durante 1991, año a partir del cual se empieza a apreciar el descenso y para el año 2005, el área abarcada por la superficie del lago había decrecido casi un 50%. Este proceso tomó unos catorce años y después del mismo se aceleró, hasta que finalmente la laguna se secó por completo durante el 2009. Posteriormente, se forma de nuevo, pero sin volver a recuperar sus niveles máximos, por lo que rápidamente se seca en enero de 2013, sin haber reaparecido al finalizar el período de estudio correspondiente a diciembre del 2014.

Aplicación de método fotográfico para estimar las áreas de la laguna en diferentes momentos.

Rouwet (2011), desarrolló un método fotográfico para detallar la morfología del fondo del cráter del volcán El Chichón, utilizando imágenes captadas durante un período de tiempo en el cual este lago pasó por etapas de secado y llenado del mismo, además de una imagen perpendicular a la superficie y un contorno del lago realizado con GPS para una fecha conocida. El artículo, publicado en la revista Limnology en 2011, se presenta en el apéndice 1.

En este estudio se aplicó el mismo método para el lago del cráter Principal del volcán Irazú, con el fin de determinar la morfología del fondo del cráter y el área abarcada por la superficie del lago, y posteriormente, compararla con los períodos lluviosos tratando de establecer una relación entre ambos. En el Anexo 4 se encuentran los detalles de la metodología seguida para la aplicación del método de Rouwet.

En la figura 29, los diferentes contornos mostrados corresponden con la orilla de la laguna para la fecha indicada. En ocasiones los contornos se intersectan, esto se debe a que la geodinámica externa que actúa en el sitio activa distintos deslizamientos, que modifican la morfología del cráter en poco tiempo.

No ha sido posible determinar el volumen del lago para el período de estudio, no obstante, gracias a la morfología cóncava del cráter Principal, es posible asociar directamente aumentos y disminuciones en el área abarcada por superficie de la laguna, con aumentos y disminuciones en su volumen.

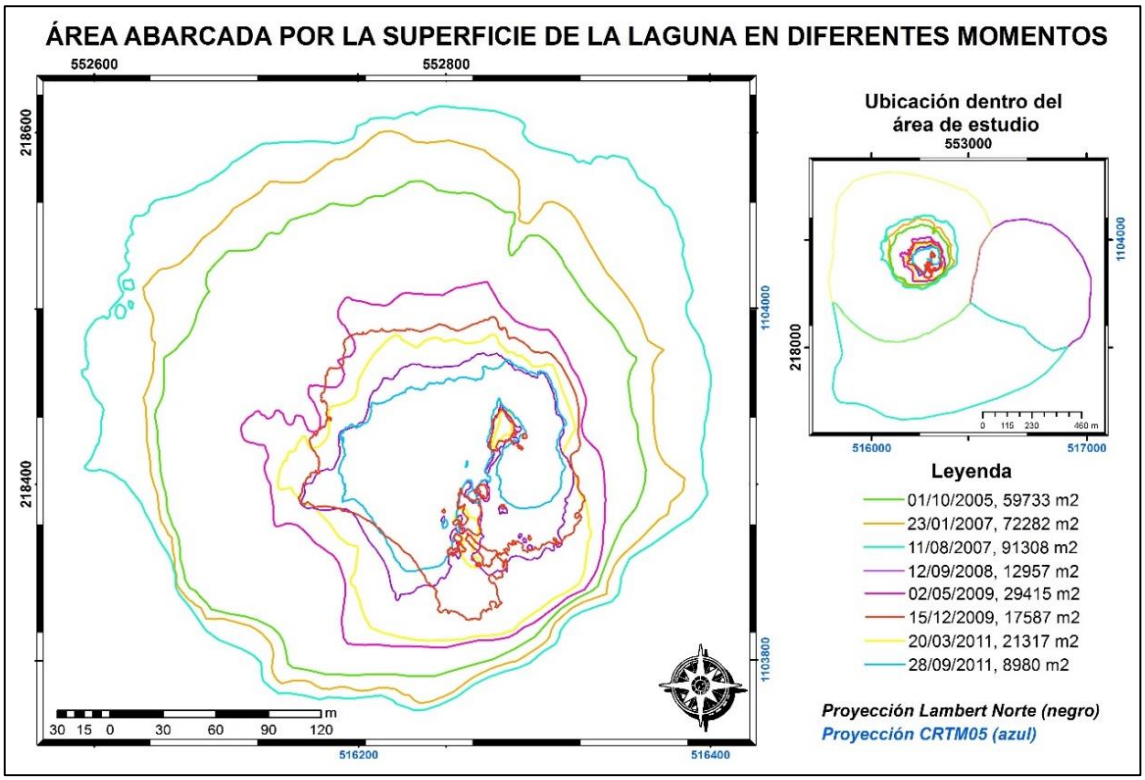


Figura 29. Área abarcada por la superficie de la laguna formada en el cráter Principal para diferentes momentos dentro del período de estudio.

4.2 Volcán Turrialba

Para el caso del volcán Turrialba, no se obtuvo registro de formación de lagunas permanentes en su cima, no obstante en varias ocasiones se ha observado la formación de laguna efimeras en todos los cráteres.

Estas lagunas efímeras presentan por lo general un pH ácido, y su formación se encuentra asociada con el aporte de iones ácidos como cloruro y sulfato,

provenientes de la lluvia ácida alimentada por los gases de las fumarolas, así como capas de ceniza que ayudan a impermeabilizar el cráter.

Algunos ejemplos previos a 2014, para los que se conoce acerca de la presencia de estos lagos efímeros se indican a continuación:

1- Aparición de laguna a mediados del año 2001, en el cráter central. Profundidad máxima de 1 m, su presencia se asocia con a los períodos de mayor aporte de precipitaciones en la zona (Mora *et al*. 2004).
2- Lago Turquesa en el cráter activo en junio-julio de 2011 (Fernández *et al*. 2011 b; c), con temperaturas de 23°C y un pH 0,6 medidas en junio
3- Lago efímero en el cráter activo (González *et al*. 2013 e)
4- Presencia de lago poco profundo en el cráter central, durante junio, julio, y noviembre del 2013. Para estos meses, se tiene información detallada, por ejemplo, para el mes de junio la temperatura fue 13°C, con un pH=2,5 y un color turquesa debido a suspensión de minerales como sílice y azufre. Durante el mes de julio, la temperatura fue de 15°C y el pH de 1,5. Para noviembre la temperatura se mantuvo en 15º C, y el pH fue de 2, con un color turquesa similar al presentado en junio (González *et al*. 2013 c, d, f).

Durante el año 2014, no se observó presencia de lago efímero dentro del cráter activo, en su lugar se observaron en el fondo grietas de desecación. Sin embargo en el cráter central se formó una laguna efímera de coloración verdosa entre agosto y noviembre de 2014 (González *et al*. 2014 b; f y i). En el descenso realizado al cráter central el 30 de octubre de 2014, se midieron temperaturas del lago en 14°C, y se determinó una profundidad aproximada del mismo de 80 cm, el mismo abarcaba aproximadamente un 40% del fondo del cráter (Figura 30).

Figura 30. Cráter Central del volcán Turrialba. Izquierda, en Agosto de 2014; Derecha, Octubre de 2014.

En el fondo del cráter Noreste, se observaron grietas de desecación en la mayoría de meses analizados. Sin embargo en el mes de abril del 2014 se observó una concentración escasa de agua en el sector central del mismo, sin que se diera el desarrollo de una laguna (figura 31).

Figura 31. Pequeña laguna efímera en el cráter Noreste.

5. BALANCE HÍDRICO

El concepto de balance hídrico consiste en aplicar el principio de la conservación de masa, a una región definida por unas determinadas condiciones de contorno y para un determinado período de tiempo. Se establece que la diferencia entre las entradas y las salidas del sistema que se han definido, es igual a la variación de almacenamiento (FCIHS, 2009).

Dentro del presente balance aplicado a la cima de dos volcanes activos, se incluyeron los aportes y salidas de agua de los sistemas hidrotermales superficiales, en unidades de volumen.

El balance hídrico se realizó en un mismo período de tiempo, para las áreas definidas en ambos sistemas volcánicos del Turrialba e Irazú, extendiéndose desde enero a diciembre de 2014, lo cual permitió comparar resultados.

A su vez, se realizaron dos balances más, aplicados en años diferentes para ambos volcanes. El año se estableció, con base en los datos de precipitación disponibles, así como los períodos en los que existió variación en el nivel de lagunas cratéricas. Para el volcán Irazú, se realizó un balance analizando el período comprendido entre enero y diciembre de 2005, cuando se encontraba una laguna en el cráter Principal. En el caso del volcán Turrialba se realizó un balance para 2011, año en que las precipitaciones fueron más intensas con respecto al 2014.

La metodología de balance hídrico aplicada en el presente estudio, fue la definida por Schosinsky (2006), en ella se integran numerosas variables que no se toman en cuenta en otros métodos. El objetivo de su aplicación es determinar la cantidad de agua que se recarga en los sistemas volcánicos, ya sea en forma de lagos o acuíferos someros.

Para cada balance hídrico, se evaluaron los componentes básicos del sistema definidos por Schosinsky (2006), los cuales son:

1. Fracción de lluvia interceptada por el follaje.
2. Infiltración básica del suelo (fc).

3. Infiltración pluvial mensual (Pi).
4. Escorrentía superficial (ESC).
5. Evapotranspiración potencial (ETP).
6. Evapotranspiración real tentativa promedio, ocurrida durante el mes (ETPR).
7. Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes (ETR).
8. Recarga potencial del acuífero (RP).

En la figura 32, se muestra un diagrama donde se incorporan las variables que intervienen en el balance hidrico en un sistema volcánico.

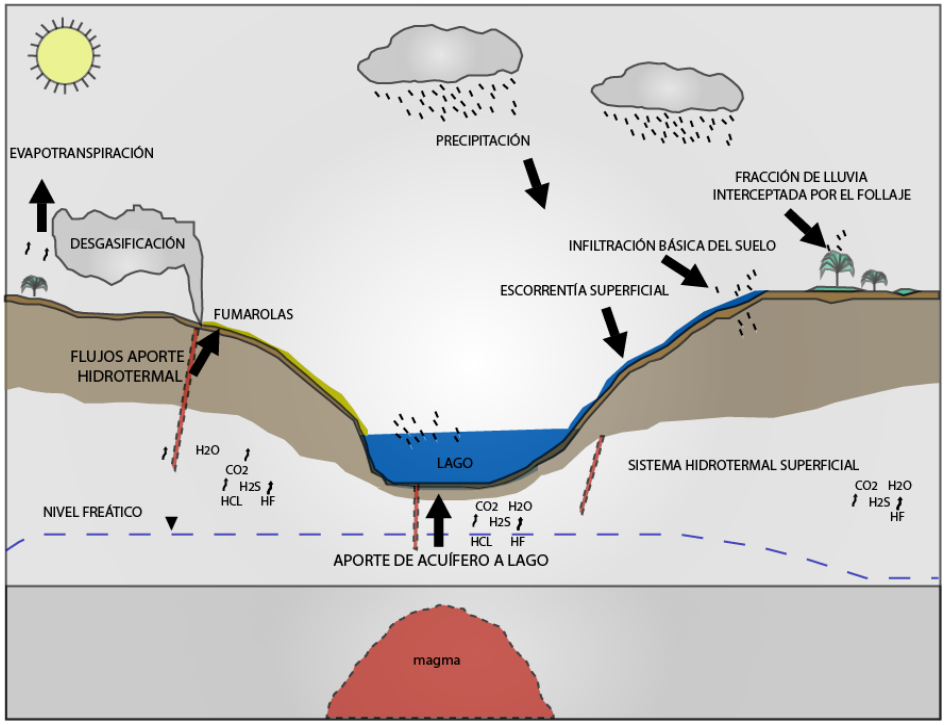


Figura 32. Componentes del balance hídrico.

En el Anexo 5 se incluye el procedimiento seguido para determinar las variables o componentes que conforman el balance, según las fórmulas definidas por Schosinsky (2006) para el cálculo de las mismas.

5.1 Volcán Irazú

5.1.1 Parámetros disponibles

a. Áreas definidas

Dentro del volcán Irazú se definieron tres microcuencas, identificadas como cuenca Diego de la Haya, cuenca Playa Hermosa y cuenca Principal, sobre las cuales se desarrollaron los respectivos balances hídricos. A su vez, cada una de estas cuencas se subdividió en áreas (figura 33 cuadro 3), principalmente en función de la variación de diversos parámetros vinculados a la abundancia o escasa vegetación, según la zona.

Cuadro 3. Áreas definidas, cima del volcán Irazú.

Nombre de áreas	Código de área	Superficie (m²)
Área 1: Cráter Diego de la Haya	A1. CDH	145451,41
Área 2: Cráter Diego de la Haya	A2. CDH	102193,36
Área 3: Cráter Playa Hermosa	A3. CDH	135826,36
Área 4: Cráter Playa Hermosa	A4. CPH	222660,93
Área 5: Cráter Principal	A5. CPH	285775,09
Área 6: Cráter Principal	A6. CPH	118697,57
Área 7: Cráter Principal	A7. CP	56045,71

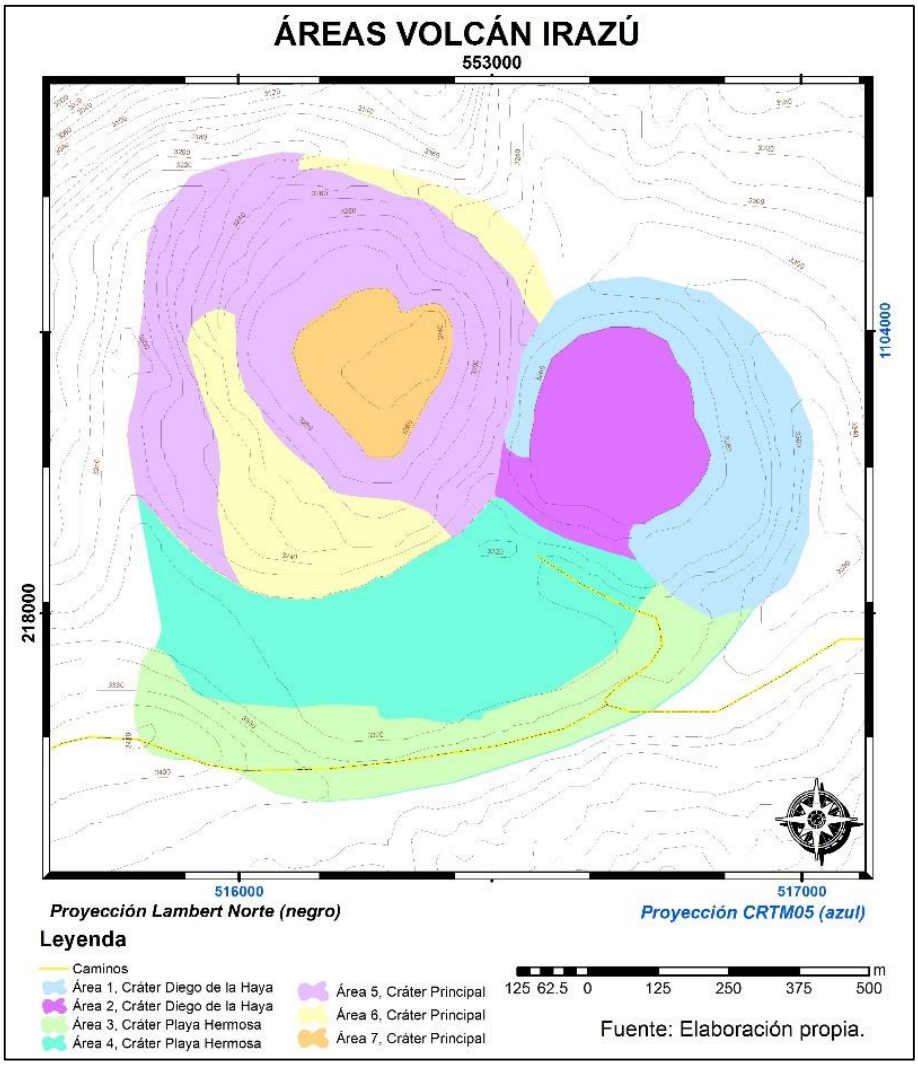


Figura 33. Áreas definidas en la cima del volcán Irazú.

b. Precipitación y temperatura de cuencas.

Con los datos del Instituto Meteorológico Nacional, se realizó el gráfico de la figura 34, el cual incluye el registro de lluvia aproximada en milímetros, que ha caído en la cima del volcán Irazú desde el año 2005 hasta el 2014.

El Instituto Meteorológico Nacinal (IMN), brindó los datos disponibles para el período de estudio en las estaciones meteorológicas más cercanas a las cimas de los volcanes. La número 73137 corresponde con la estación utilizada para el volcán Irazú, localizada 1,4 km al sureste de la cima. Las coordenadas exactas donde se localiza esta estación, se muestran en el Anexo 5.

Algunos de los datos mensuales no tenían registro en la estación de interés, por lo cual se obtuvieron valores promedio del mes del año previo y posterior al mes de análisis. Sin embargo la mayoría de los meses contaban con registro de la información, además los valores promedio obtenidos se consideraron confiables, ya que se ajustaron al comportamiento promedio de las lluvias características en la zona.

En la figura 34 se observa, que los meses con mayor precipitación en el volcán Irazú, correspondieron con los últimos tres o cuatro meses de cada año, mientras que los de menor precipitación resultaron ser los cuatro meses iniciales de cada año (enero, febrero, marzo y abril).

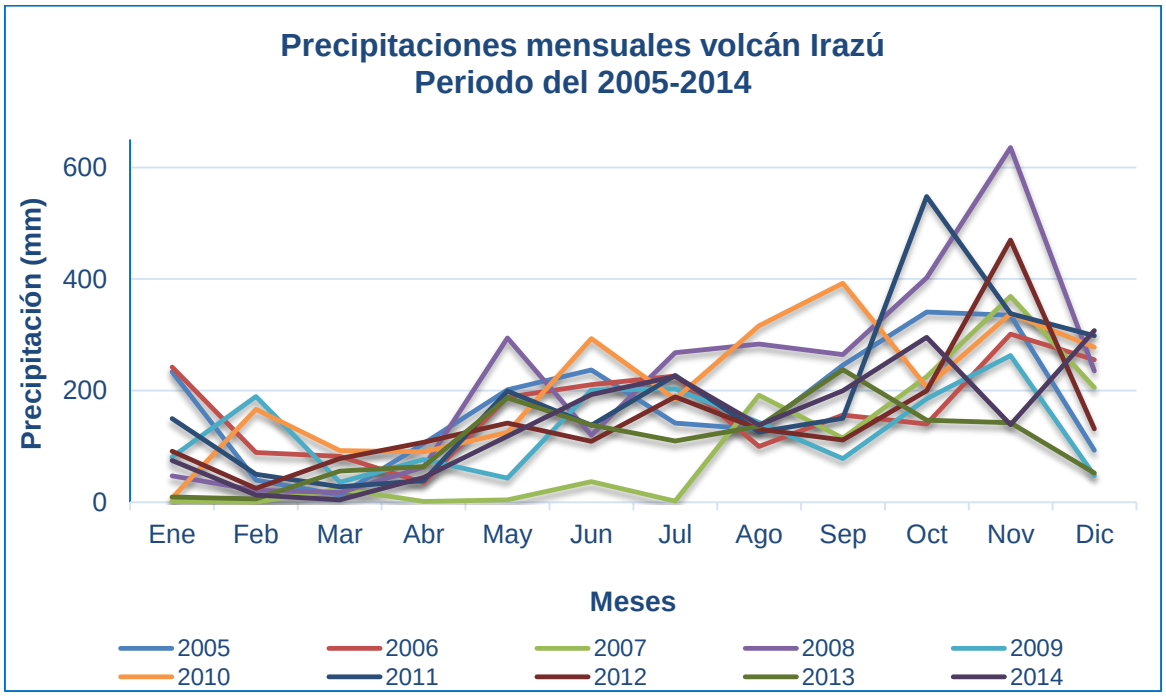


Figura 34. Registro de precipitaciones en el volcán Irazú. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.

Para el desarrollo del balance hídrico se realizaron climogramas correspondientes a los períodos de interés (año 2005 y 2014).

Para el período del año 2005, se observó que los meses más lluviosos correspondieron con setiembre, octubre y noviembre con un valor máximo de 340,8 mm, mientras que los meses con menor precipitación respectivamente son diciembre y abril, con un valor mínimo de 12,8 mm (figura 35).

Dentro del período de análisis del año 2014, la temperatura media se mantuvo entre 7,6 °C y 9,2 °C, mientras que la precipitación mensual varió entre los 4,5 mm y 307,5 mm, siendo los meses de diciembre y octubre, los de mayor precipitación (figura 36). La precipitación anual, para toda la cuenca durante el período 2005, fue de 2117,9 mm, tal y como se muestra en la figura 37.

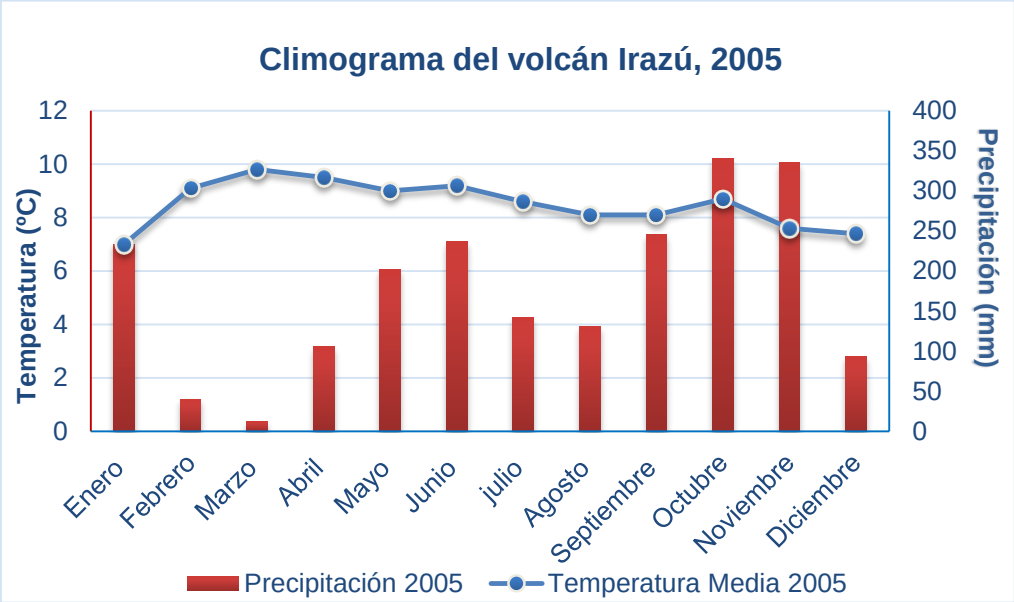


Figura 35. Climograma del año 2005, de la estación volcán Irazú.

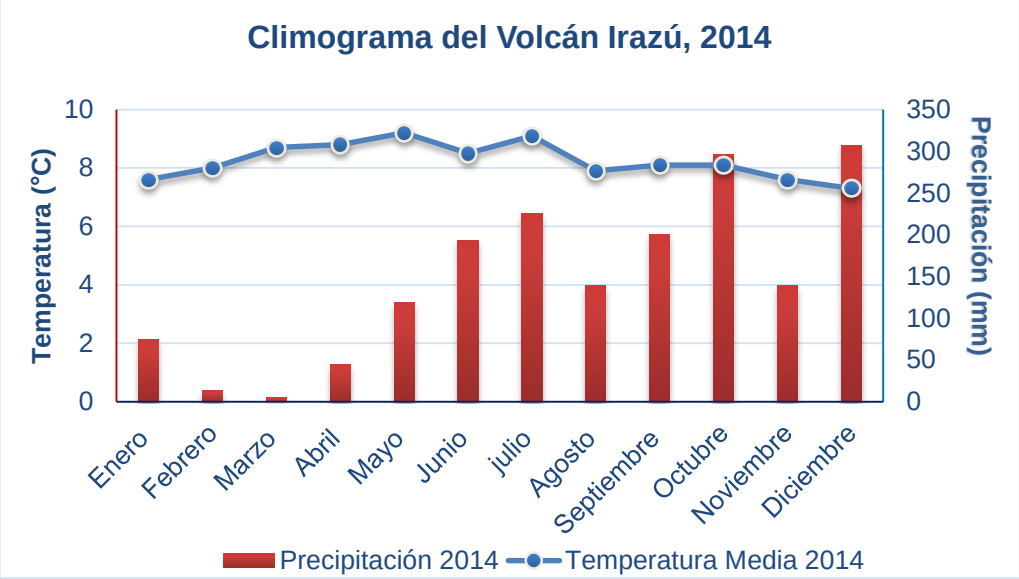


Figura 36. Climograma del año 2014, de la estación volcán Irazú.

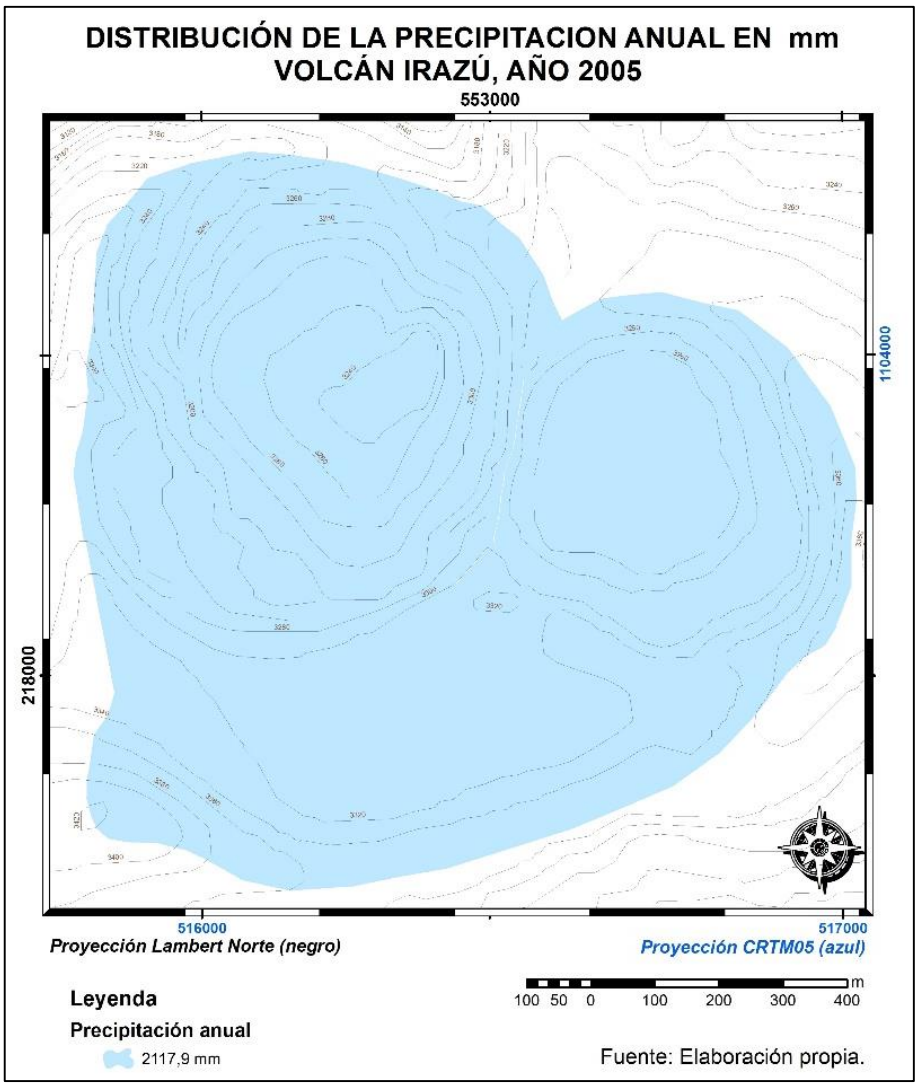


Figura 37. Mapa de precipitación para el período 2005, cima del volcán Irazú.

Para el desarrollo del balance del 2005, se analizaron los meses consecutivos en donde la precipitación que infiltró en la zona, superó la evapotranspiración potencial, asignandole al mes siguiente el valor de capacidad de campo. Siendo así que los meses en que se cumplió la situación expuesta anteriormente correspondieron con: mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, y noviembre, asignadole el valor de humedad incial al mes de diciembre del 2005.

Se tiene además que para junio hasta diciembre del año 2014, se superó la precipitación que infiltró en las cuencas del volcán Irazú, con respecto al valor de evapotranspiración potencial, por lo cual, siguiendo el método de Schosinsky (2006) al mes de enero de 2014, se le asignó el valor de la humedad inicial de la zona el valor de capacidad de campo. La figura 38 corresponde al mapa de precipitación del volcán Irazú en 2014, donde el valor anual fue de 1754,7 mm.

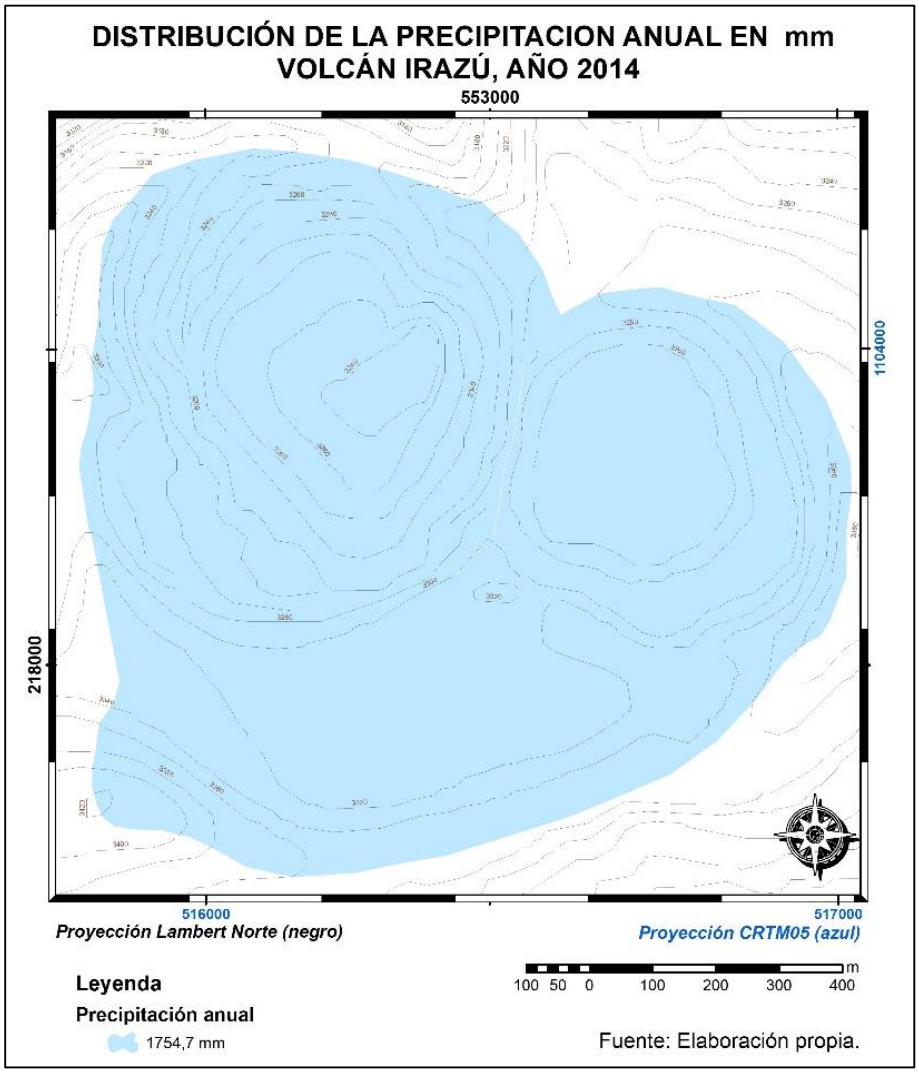


Figura 38. Mapa de precipitación para el período 2014, cima del volcán Irazú.

c. Vegetación de cuencas

En las cuencas definidas en la cima del volcán Irazú, se observó el desarrollo de vegetación de tipo páramo, la cual representa un 37% del total del área de estudio. El porcentaje de área restante, correspondió con sectores donde no se observó un desarrollo de vegetación importante.

Se asignaron valores de kv entre 0,09 y 0,18, para zonas donde existe zacate en menos de un 50%, y para zonas con vegetación tipo páramo, respectivamente.

Se utilizó un valor de Kv de 0,09 para las áreas número 2, 4, 5 y 7, asumiendo que existe escasa o nula influencia de la vegetación, ya que prácticamente el terreno se encontró desprovisto de la misma y en su mayoría seca o con escaso desarrollo.

Mientras que a las áreas número 1, 3, y 6, donde la vegetación de páramo, se observó más desarrollada, el valor asignado de Kv=0,18 correspondiente al valor teórico asignado a páramos. La profundidad de las raíces en la zona de estudio varió entre 7 cm a 25 cm, esto según las observaciones de campo.

En la figura 39, se observa la distribución predominante de vegetación en el área de estudio del volcán Irazú.

Schosinsky (2006) indica que para efectos de un balance hídrico, se debe asignar un coeficiente de retención del follaje, adimensional y denominado como Cfo, determinando que: para bosques muy densos Cfo es igual a 0,20, mientras que para otro tipo de follajes se debe asignar un valor de Cfo igual a 0,12, este último, fue el valor asignado a toda el área de estudio del volcán Irazú.

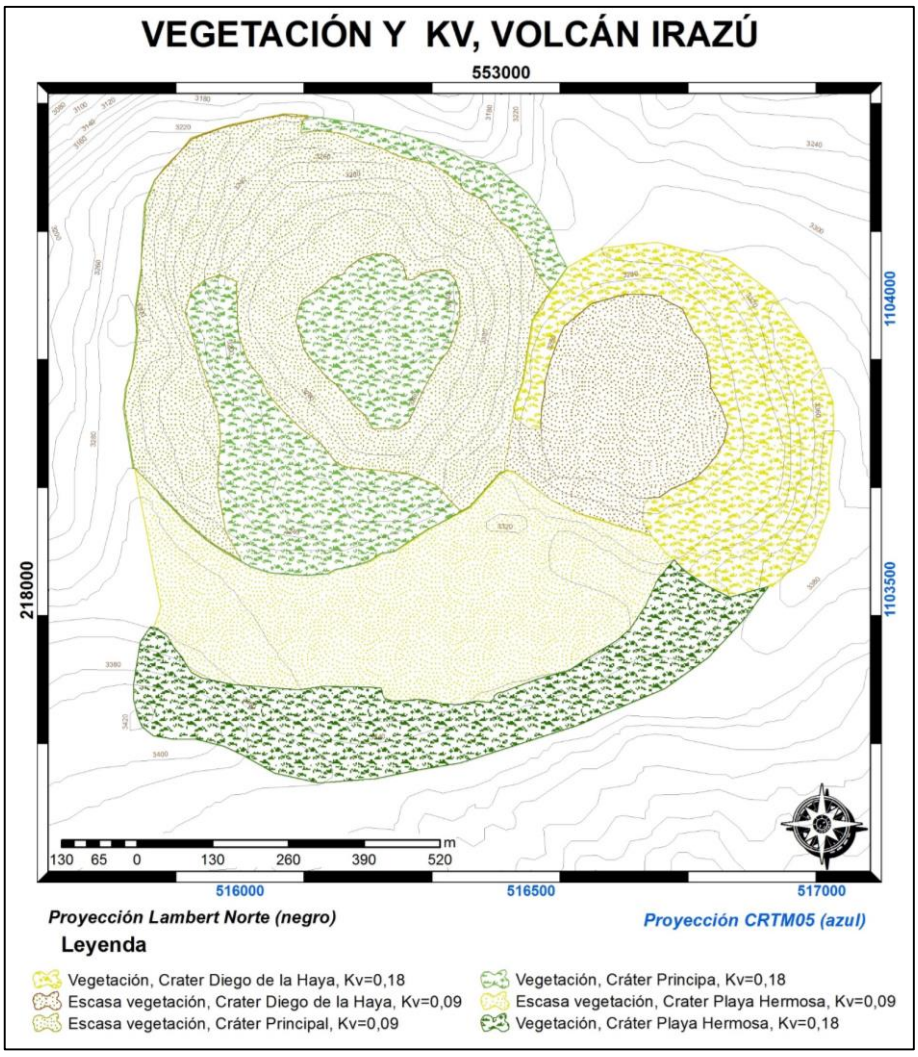


Figura 39. Distribución de la vegetación en la cima del volcán Irazú.

d. Infiltración

Dentro de las diversas cuencas definidas para la cima del volcán Irazú se realizaron un total de veintiseis pruebas de infiltración mediante el infiltrómetro Turf Tec® (Anexo 6), la ubicación de las pruebas se muestra en la figura 40.

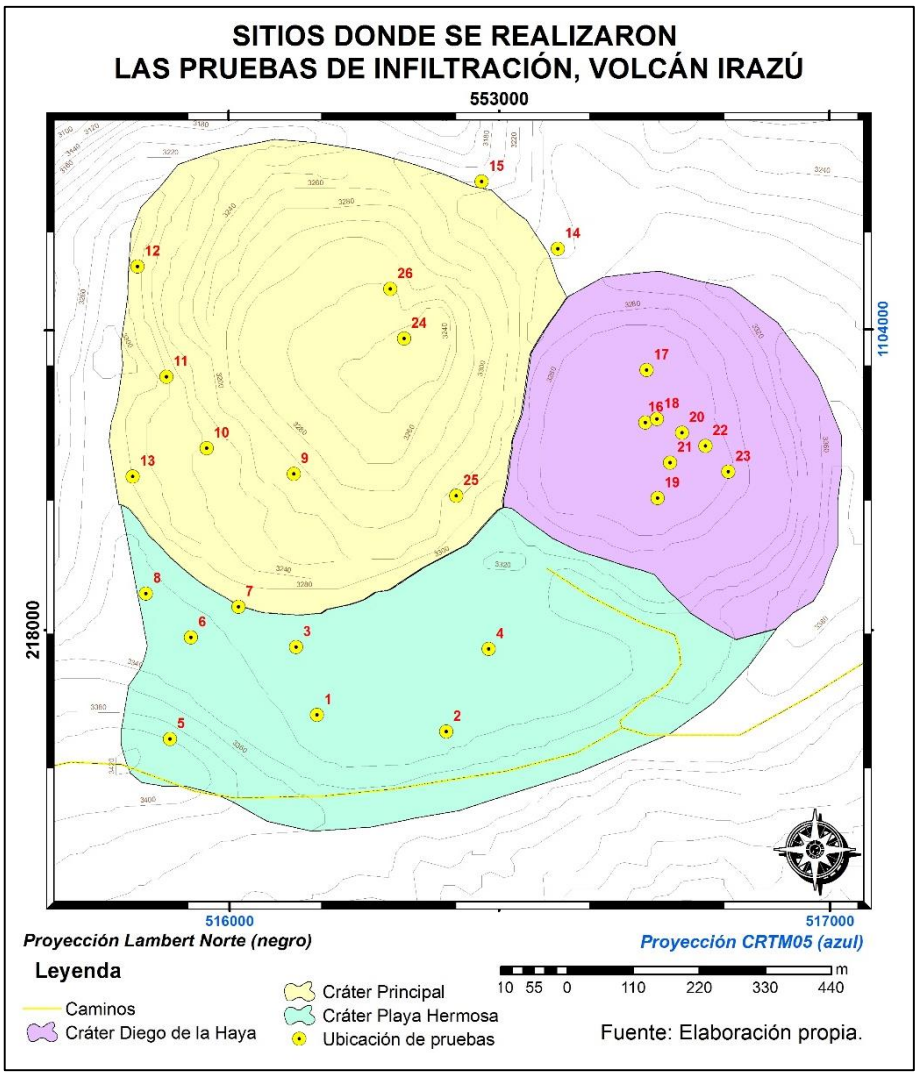


Figura 40. Mapa de ubicación de sitios de pruebas de infiltración realizadas mediante el método Turf-Tec ®.

Para la asignación de valores de infiltración de las áreas número 1 y 2, se utilizó el promedio de los resultados obtenidos a partir de las pruebas de infiltración realizados en el cráter Diego de la Haya, el cual fue de 21792,6 mm/día.

En las áreas número 3 y 4, se utilizó el valor promedio de las pruebas de infiltración realizadas en el cráter Playa Hermosa, correspondiente a 6734,40 mm/día.

Finalmente, en las áreas número 5, y 6, el valor empleado correspondió al promedio de las pruebas de infiltración realizados en los alrededores del cráter Principal, correspondiente a 30242,2 mm/día. Mientras que el valor para el área número 7, fue obtenido a partir del promedio de tres pruebas de infiltración realizadas en el cráter Principal correspondiente a 8112 mm/día. Estos datos se presentan en la figura 41.

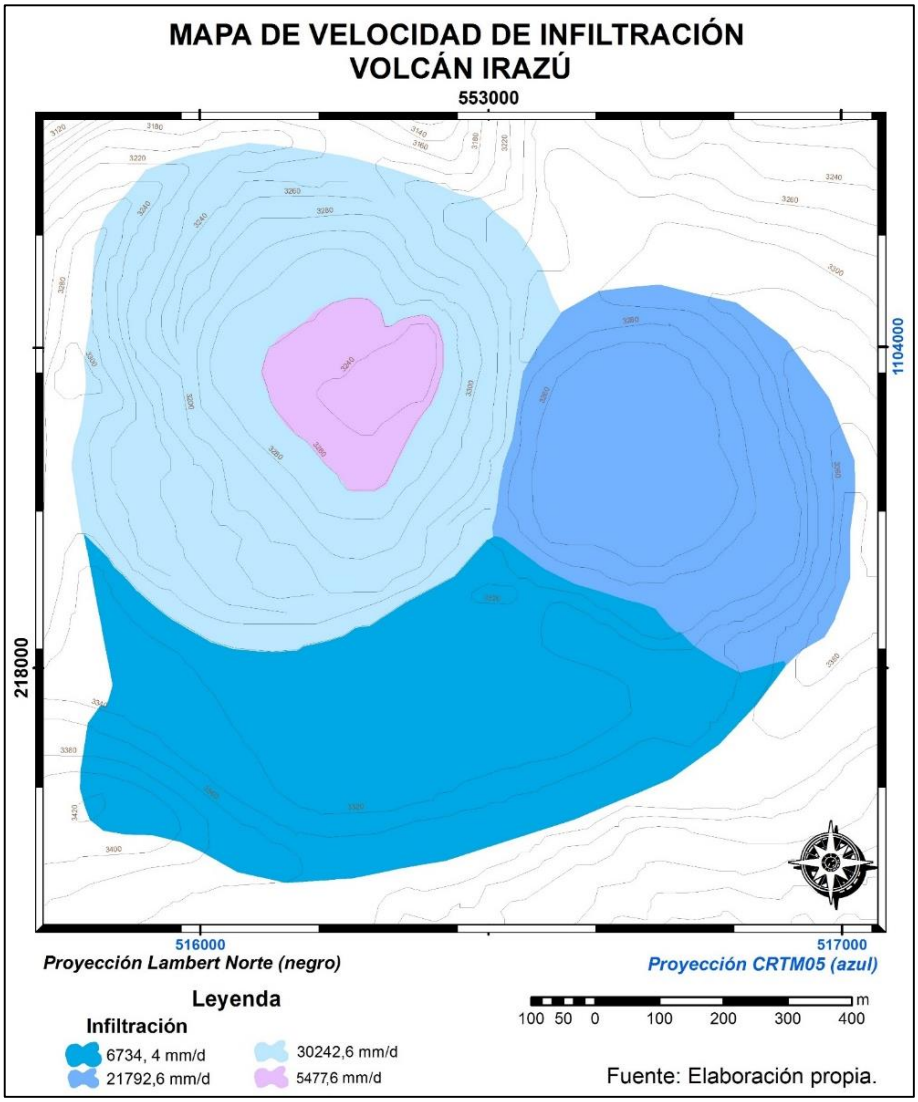


Figura 41. Mapa de velocidades de infiltración para la cima del volcán Irazú, obtenido a partir de ensayos de campo con el infiltrómetro Turf-Tec ®.

e. Pendientes

Las pendientes características en las diversas microcuencas que conforman la cima del volcán Irazú, son por lo general fuertes y mayores a un 7%. En casos como este, Schosinsky & Losilla (2000) determinaron que al parámetro Kv, se debe asignar un valor de 0,06, y por lo tanto, fue el valor aplicado en todas las áreas de estudio.

El mapa de pendientes del volcán Irazú, se realizó con base en un modelo de elevación digital Aster GDem, con una resolucion de 30 m, donde las pendientes se clasificaron por porcentaje, según los valores indicados por Schosinsky & Losilla (2000). A partir de estos, se obtuvo que en las zonas estudiadas, únicamente se presentaron pendientes con valores superiores al 1,1%, predominando en casi toda la totalidad del área de estudio, pendientes mayores a un 7% (figura 42).

En el cuadro 4, se muestran los rangos de pendientes, y el área que abarcan dentro de la zona de estudio del volcán Irazú.

Cuadro 4. Valores de pendientes y Kp asociado, a la cima del Volcán Irazú en los rangos requeridos para la metodología.

Tipo de pendiente	Pendiente (%)	Pendiente (°)	Kp	Área (m^2)
Plana	1%-2%	0,57293°-1.14576°	0,15	4496
Moderada	2%-7%	1.14576°-4°	0,10	69124
Fuerte	mayor de 7%	> 4°	0,06	999320

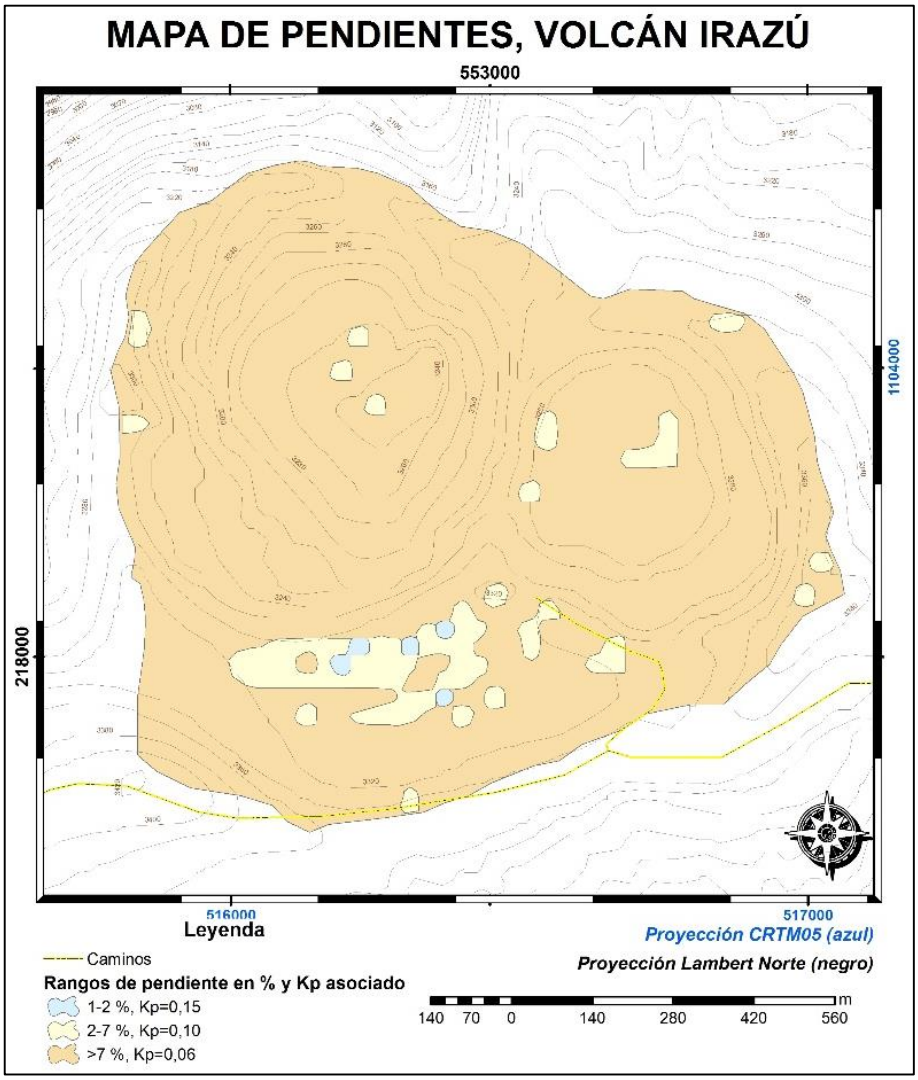


Figura 42. Mapa de pendientes (en %) de la cima del volcán Irazú, en los rangos requeridos para la metodología.

f. Capacidad de campo y punto de marchitez

Los valores porcentuales de capacidad de campo y punto de marchitez para todas las áreas definidas en la cima del volcán Irazú fueron respectivamente de 19,43% y 14,31% (cuadro 5, figuras 43 y 44). Para todas las áreas del volcán Irazú, se asignó el valor promedio obtenido a partir de los ensayos realizados, ya que en la mayoría de las áreas había mucha variación de suelos.

Cuadro 5. Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM).

Muestras volcán Irazú			Retención de agua (%/p)	
N° de muestra	**Suelo**	**Cráter**	**CC 1/3 ATM.**	**PMP 15 ATM**
9	SM	Playa Hermosa	22,45	15,89
10	SW-SM	Playa Hermosa	19,71	14,38
25	SW-SM	Diego de la Haya	18,24	13,67
28	SP	Diego de la Haya	17,32	13,28
PROMEDIO			19,43	14,31

Fuente: Datos obtenidos en los laboratorios del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y del Laboratorio Nacional de Materiales y modelos estructurales (LANAMME).

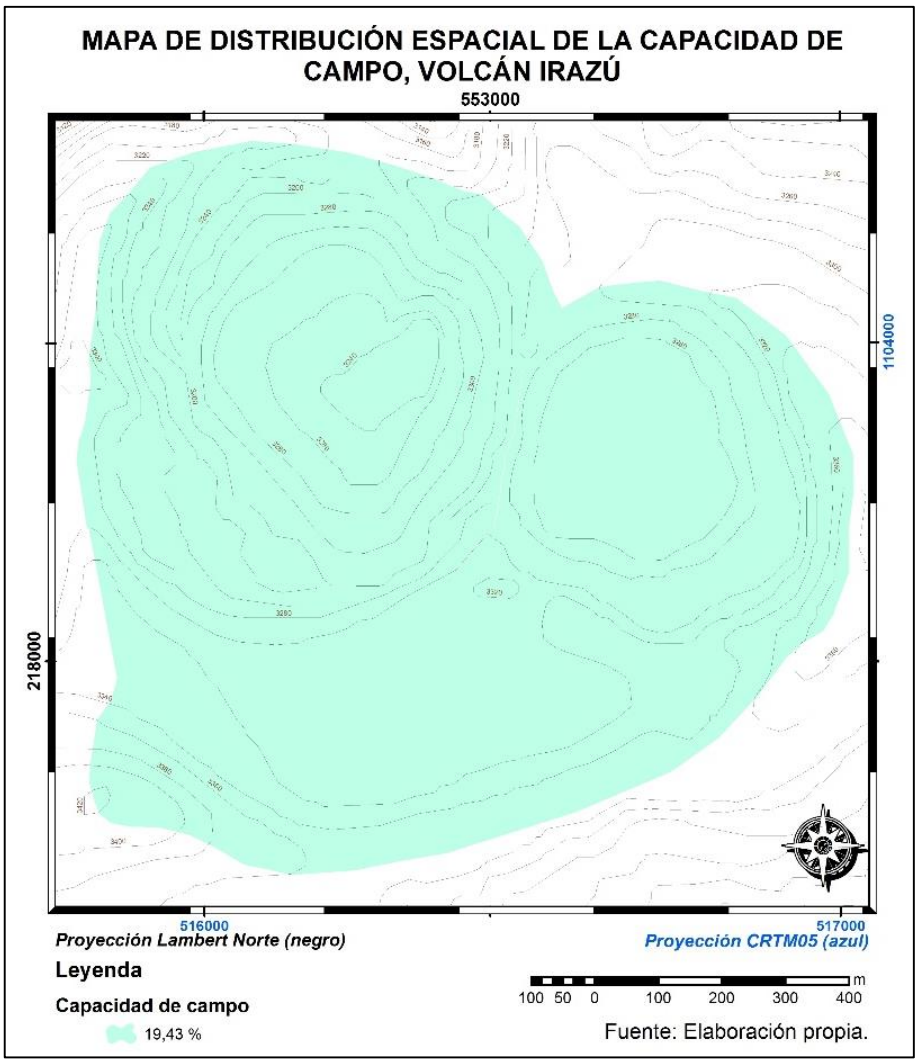


Figura 43. Mapa de distribución espacial de la capacidad de campo (CC), en la cima del volcán Irazú.

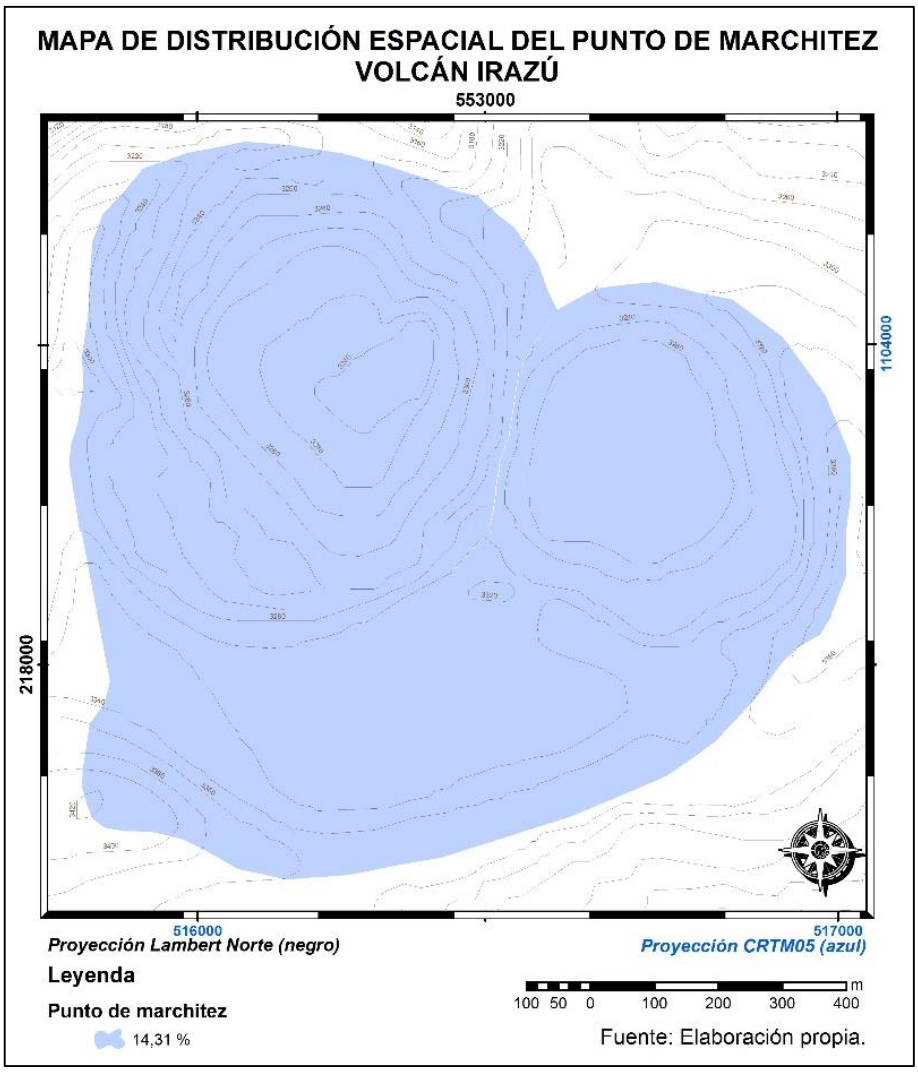


Figura 44. Mapa de distribución espacial del punto de marchitez (PM), en la cima del volcán Irazú.

g. Evapotranspiración

Para el cálculo de evapotranspiración en el volcán Irazú, se utilizó la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972), y los valores de porcentaje de horas de luz solar mensual para la latitud 10º, del hemisferio norte correspondiente a la ubicación de Costa Rica, esto según Calvo (1999). Los valores de evapotranspiración obtenidos para los años 2014 y 2005 en el volcán Irazú, se presentan en los cuadros 6 y 7, donde: ETP= Evapotranspiración potencial (mm/mes), T= Temperatura media mensual (°C), Ps= Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año.

Cuadro 6. Evapotranspiración (ETP) para el volcán Irazú durante 2014.

	Mes											
	Ene	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
Ps	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10
T	7,60	8,00	8,70	8,80	9,20	8,50	9,10	7,90	8,10	8,10	7,60	7,30
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81

Cuadro 7. Evapotranspiración (ETP) para el volcán Irazú durante 2005.

	Mes											
	Ene	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
Ps	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10
T	7,00	9,10	9,80	9,50	9,00	9,20	8,60	8,10	8,10	8,70	7,60	7,40
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18

h. Densidad

Los valores de densidad de las muestras analizadas en los laboratorios de LANAMME, variaron en un rango de 1,06 g/cm³ a 1,67 g/cm³. Por lo cual se le asignó a todas de las áreas del balance hídrico en el volcán Irazú, un valor promedio de 1,52 g/cm³. Los resultados se muestran en el cuadro 8, donde: Vc= Volumen del cilindro, Pss= Peso del suelo seco, D= Densidad, SP= Arenas pobremente gradadas, SW-SM= Arenas bien gradadas con limos, SP-SM= Arenas mal gradadas con limos, SM= Arenas limosas.

Cuadro 8. Densidad de los materiales, volcán Irazú.

N° Muestra	Valores de densidad volcán Irazú			
	Vc (cm^3)	Pss (g)	D (g/cm^3)	Clasificación
2	79,06	110,68	1,40	SM
3	79,06	126,50	1,60	SP
5	79,06	109,10	1,38	SM
6	79,06	134,40	1,70	SP
8	79,06	125,71	1,59	SM
9	73,96	90,23	1,22	SM
10	79,06	118,59	1,50	SW-SM
12	79,06	124,91	1,58	SW-SM
13	79,06	130,45	1,65	SP
17	79,06	128,08	1,62	SP
19	79,06	117,80	1,49	SM
20	79,06	122,54	1,55	SW-SM
22	79,06	116,22	1,47	SM
24	79,06	83,80	1,06	SC
25	79,06	120,17	1,52	SW-SM
27	79,06	132,03	1,67	SP
PROMEDIO DE VALORES DE DENSIDADES				
Promedio de valores SP				1,65
Promedio de valores SW-SM				1,54
Promedio de valores SM y SC				1,37
Promedio de todas las densidades				1,52

i. Comportamiento granulométrico de los materiales geológicos superficiales en la cima del volcán Irazú.

Granulométricamente, los materiales que componen las cuencas del volcán Irazú, correspondieron con arenas de grano fino, con ligera variabilidad en la cantidad de limos y arcillas (cuadro 9 y figura 45), los cuales se presentaron en un rango de porcentajes entre 1,8 % a 28,6 % del total de muestra analizada. Mientras que el porcentaje de material grueso correspondientes a gravas, se presentaron entre un 0% y 40,4 %.

Los materiales arenosos del volcán Irazú presentaron variabilidad en la cantidad porcentual de finos presentes en las muestras, por lo cual se procedió a la

clasificación de los mismos siguiendo la norma ASTM D2487-11, obteniendo suelos que varían dentro de las siguientes clasificaciones:

- ✓ Arenas pobremente gradadas clasificadas como SP.
- ✓ Arenas, bien gradadas, con limos clasificadas como SW-SM.
- ✓ Arenas mal gradadas, con limos clasificadas como SP- SM.
- ✓ Arenas limosas clasificadas como SM.

En el Anexo 7 se presentan todas las curvas granulométricas del volcán Irazú, y detalles asociados para las muestras analizadas.

Estos materiales comúnmente no presentaron plasticidad ya que predominaron los componentes arenoso-limoso ante la presencia de arcillas, sin embargo algunas muestras presentaron una plasticidad baja.

Las muestras analizadas de la cima del volcán Irazú, presentaron valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad correspondientes a los siguientes valores promedio: 27,7 %, 20,7% a 7 %, respectivamente (Anexo 8). A partir de lo anterior se determinó que las muestras analizadas mediante este ensayo, fueron materiales de baja plasticidad. La clasificación detallada de las muestras analizadas con base en su comportamiento granulométrico se presenta en el Anexo 9.

Dentro de las cuencas de análisis en el volcán Irazú, se obtuvo suelos que varíaron entre:

- ✓ Arenas pobremente gradadas (SP).
- ✓ Arenas, bien gradadas, con limos (SW-SM).
- ✓ Arenas mal gradadas, con limos (SP- SM).
- ✓ Arenas limosas (SM).
- ✓ Arenas arcillosas (SC).

La distribución espacial de estas clasificaciones de suelo dentro del área de interés se muestra en la figura 46.

Cuadro 9. Resumen del comportamiento granulométrico y características de los materiales en el volcán Irazú.

N° de muestra	Arena	Gradación	Gravas (%)	Finos (%)	Plasticidad	Clasificación
1	F	(W)	2,1	13,2	NP	SM
2	M	(W)	7,8	12,3	B	SM
3	F	(P)	0,0	2,3		SP
4	F	(P)	0,0	28,6	B	SM
5	F	(W)	0,7	12,4	B	SM
6	G	(P)	40,4	1,8		SP
7	F	(W)	21,0	13,9	NP	SM
8	G	(W)	24,3	13,8	NP	SM
9	F	(W)	0,2	12,7	B	SM
10	F	(W)	0,1	10,6	NP	SW-SM
11	F	(W)	9,8	20,4	B	SM
12	F	(W)	6,2	7,6	NP	SW-SM
13	M	(P)	2,6	1,8		SP
14	M	(W)	5,3	9,1	NP	SW-SM
15	F	(P)	0,1	2,1		SP
16	F	(P)	1,2	6,6	NP	SP-SM
17	M	(P)	0,7	3,4		SP
18	M	(P)	1,1	3,6		SP
19	F	(W)	0,1	14,2	NP	SM
20	M	(W)	3,9	5,2	NP	SW-SM
21	M	(W)	29,6	5,3	NP	SW-SM
22	F	(P)	1,9	21,0	NP	SM
23	F	(W)	1,5	15,8	NP	SM
24	M	(P)	0,6	24,7	B	SC
25	M	(W)	1,4	10,7	NP	SW-SM
26	M	(W)	1,9	7,5	NP	SW-SM
27	M	(P)	6,4	4,5	NP	SP
28	M	(P)	0,0	4,3	NP	SP
29	G	(P)	1,6	20,6	NP	SM
30	M	(P)	0,9	24,6	B	SC
31	G	(P)	2,0	21,2	NP	SM

En el cuadro 9, F= arena fina, M= arena media, G= arena gruesa, W= buena gradación, P= pobre gradación, B= baja plasticidad, NP= no presenta plasticidad, SW=arena bien gradada, SP=arena mal gradada y G=grava.

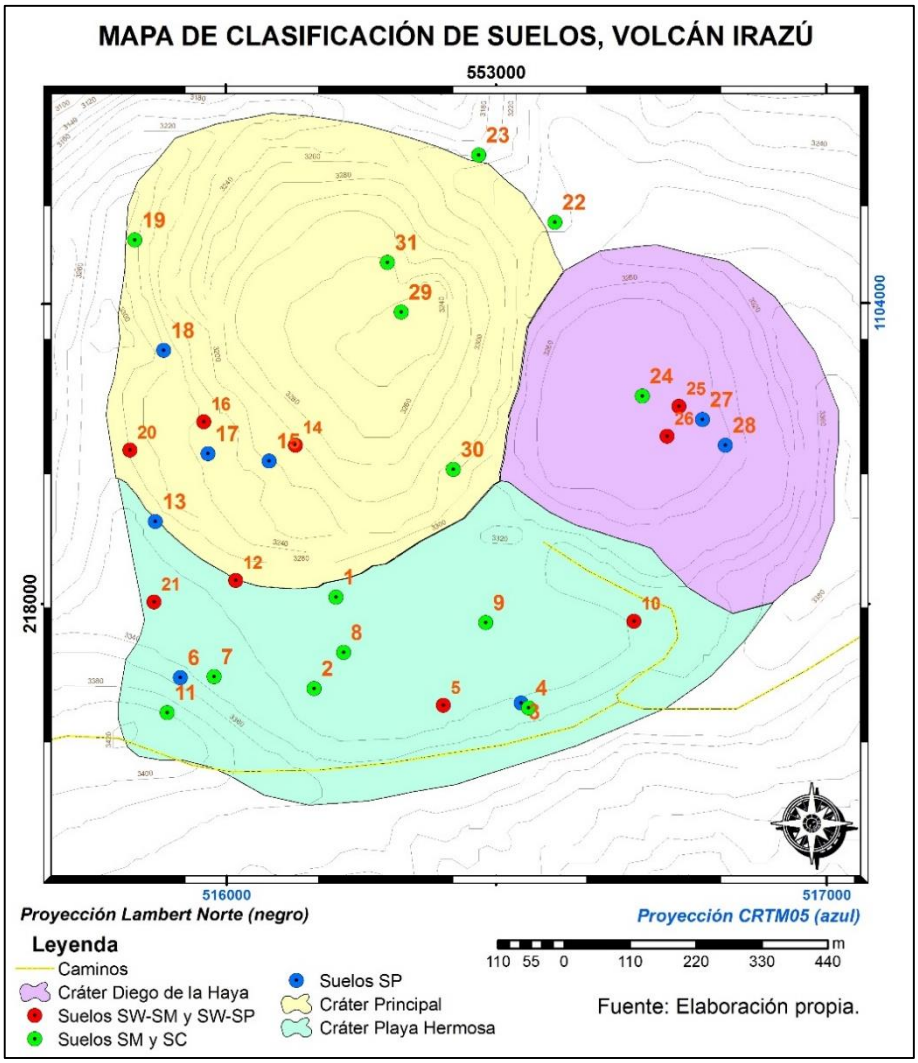


Figura 45. Clasificación de suelos en la cima del volcán Irazú según la ubicación de las muestras.

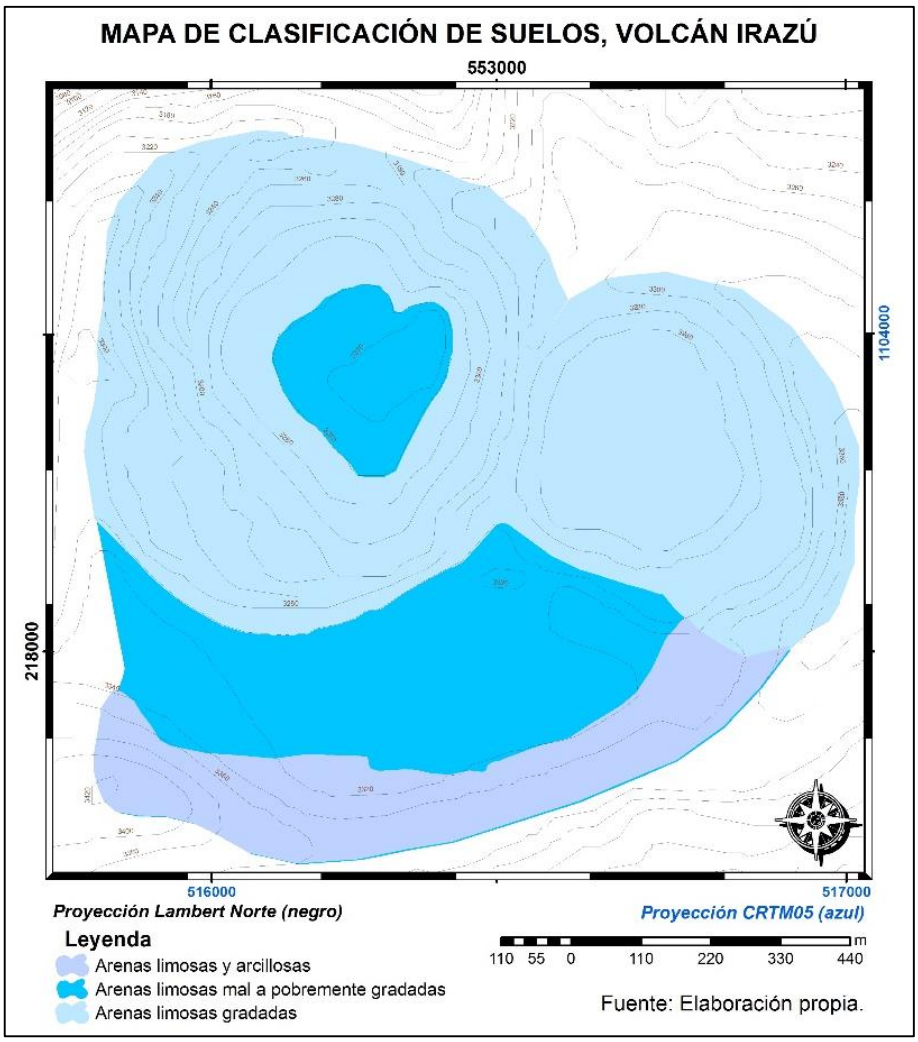


Figura 46. Mapa de distribución espacial de los tipos de suelo.

j. Descripción de los depósitos volcánicos Irazú:

Genéticamente los materiales que se encuentran ubicados en superficie de las cuencas analizadas, no corresponden con suelos, por lo cual la granulometría permitió obtener los tamaños de partículas presentes en los depósitos volcánicos recientes analizados, y a su vez describir los porcentajes de los componentes reales presentes, obteniendo así que los depósitos volcánicos ubicados en la cima del volcán Irazú, presentan una composición predominantemente andesítica, los

mismos se componen principalmente de ceniza fina a media, en porcentajes entre un 57,8 % a 97,8%, con una coloración generalmente gris a café, acompañadas de material lapilli, y predominando las rocas escorias y andesita como tal, en rango de porcentajes entre 0% a 40,4%. En menor proporción se tiene la presencia de materiales correspondientes a cenizas muy finas, con porcentajes entre 1,8 % a 28,6 %.

k. Salida de agua del sistema en forma de vapor

Dentro de los estudios relacionados con la desgasificación en el volcán Irazú, se tienen los análisis geoquímicos de Galindo *et al*. (2004), donde se analizaron las emanaciones difusas de CO_2 en la cima del volcán Irazú, determinando que el origen de estas se produjeron principalmente por influencia del componente biogénico. Sin embargo, en algunos casos correspondieron con un proceso de mezcla de CO_2 de origen profundo proveniente del proceso de asimilación magmática de carbonatos marinos que se producen en la zona de subducción.

5.1.2 Resultados del balance hídrico en el volcán Irazú

El flujo de emisión de vapor de agua en el volcán Irazú, no se determinó, esto debido a que la poca desgasificación proveniente de la actividad hidrotermal del volcán. Hay un campo fumarólico de baja temperatura situado en la ladera norte del mismo, pero se encuentra fuera del área de estudio. La desgasificación en ese sector es escasa, y se encuentra representada por los campos fumarólicos con temperaturas de desgasificación cercana al punto de ebullición del agua a estas altitudes, manteniéndose normalmente alrededor de los 90° C, por lo cual se considera que la mayoría consiste en vapor de agua.

En los Anexos 10 y 11, se presentan las tablas de excel con los cálculos realizados para los períodos 2005 y 2014 en cada una de las áreas definidas dentro del volcán Irazú. Mientras que en los cuadros 10 y 11 se muestran los resultados de recarga potencial, áreas y volumenes registrados en cada microcuenca, obteniendo un volumen total de recarga para el volcán Irazú en cada período de análisis. Se

definieron zonas de recarga con base en las áreas previamente definidas para realizar el balance hidrico, estas zonas se muestran en la figura 47.

La figura 48 representa el mapa de recarga potencial para el 2005, mientras que la figura 49, corresponde con el porcentaje de recarga potencial anual, que representa el porcentaje de lluvia que logra recargar en cada zona. En algunos casos, se unificaron las zonas debido a que los datos obtenidos coincidieron para dos o más de las áreas.

En la figura 50 se muestra el mapa de recarga potencial para el 2014, mientras que la figura 51, corresponde con el porcentaje de recarga potencial anual para el período de análisis 2014.

Cuadro 10. Recarga potencial anual por cuenca, volcán Irazú 2005.

RECARGA POTENCIAL ANUAL-VOLCÁN IRAZÚ (2005)			
Cuenca	**Rp (mm)**	**Área (m²)**	**V (m³/año)**
A1. CDH	873,07	145451,40	126989,26
A2. CDH	906,92	102193,40	92681,20
A3. CPH	873,07	135826,40	118585,92
A4. CPH	906,92	222660,90	201935,65
A5. CP	906,92	285775,10	259175,14
A6. CP	839,75	118697,60	99676,28
A7. CP	906,92	56045,71	50828,98
Recarga potencial total			949872,44

Cuadro 11. Recarga potencial anual por cuenca, volcán Irazú 2014.

RECARGA POTENCIAL ANUAL-VOLCÁN IRAZÚ (2014)			
Cuenca	**Rp (mm)**	**Área (m²)**	**V (m³/año)**
A1. CDH	673,67	145451,40	97986,25
A2. CDH	687,68	102193,40	70276,33
A3. CPH	673,67	135826,40	91502,14
A4. CPH	687,68	222660,90	153119,47
A5. CP	687,68	285775,10	196521,81
A6. CP	654,99	118697,60	77745,72
A7. CP	687,68	56045,71	38541,51
Recarga potencial total			725693,24

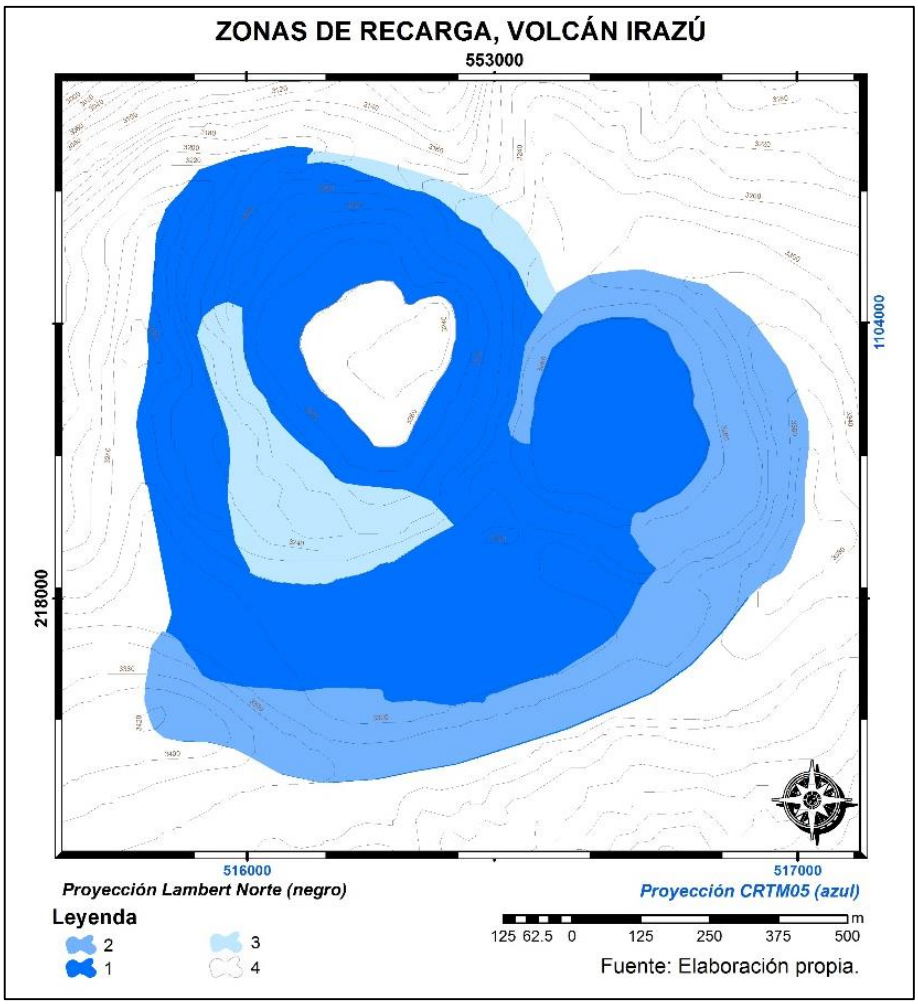


Figura 47. Zonas de recarga potencial, volcán Irazú, para ambos años 2005 y 2014.

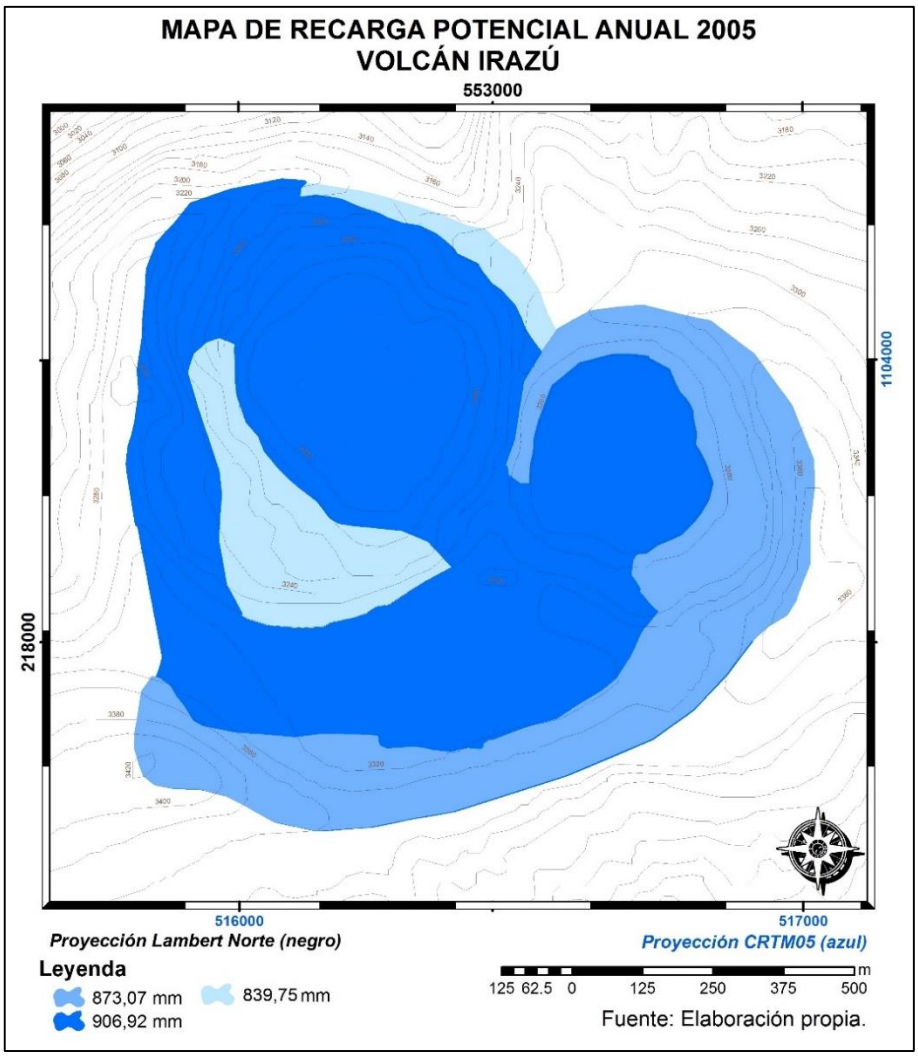


Figura 48. Mapa de recarga potencial anual 2005, cima del volcán Irazú.

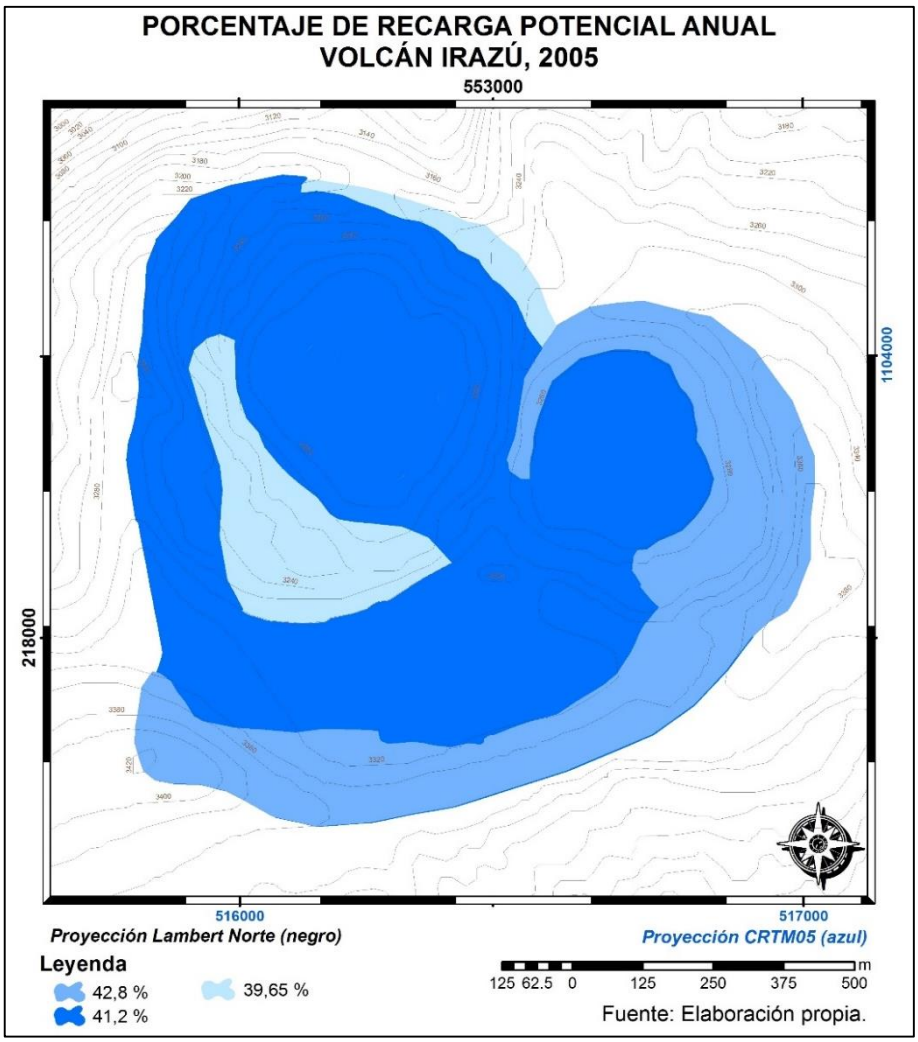


Figura 49. Porcentaje de lluvia que logró recargar durante el período 2005, en la cima del volcán Irazú.

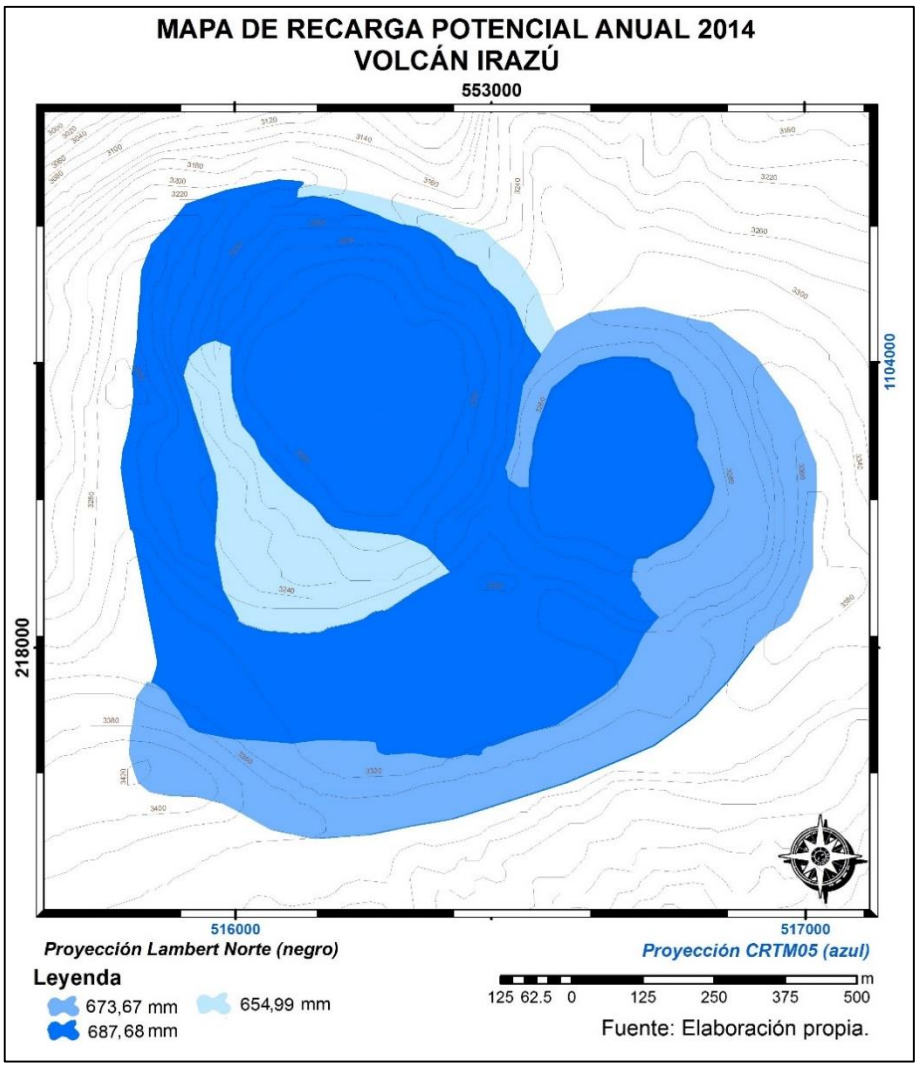


Figura 50. Mapa de recarga potencial anual para el año 2014, cima del volcán Irazú.

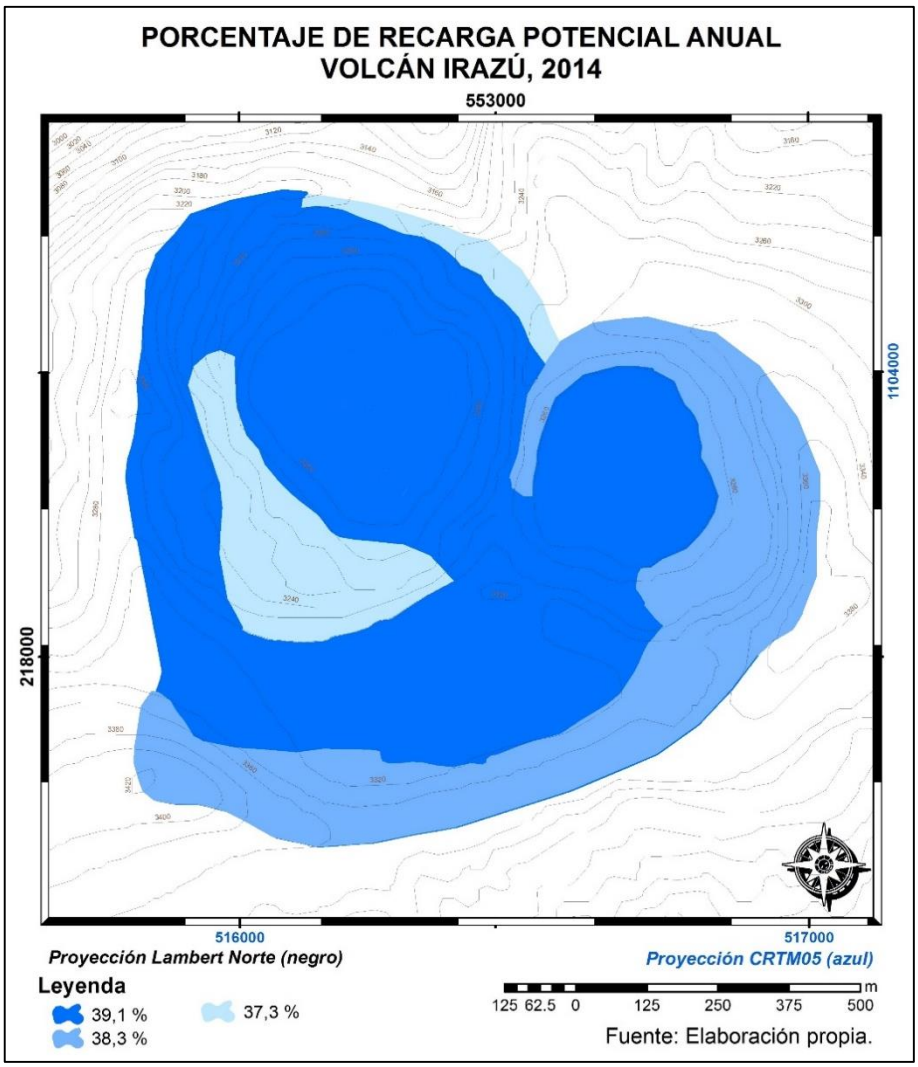


Figura 51. Porcentaje de lluvia que logró recargar durante el período 2014, cima del volcán Irazú.

5.2 Volcán Turrialba

5.2.1 Parámetros disponibles

a. Áreas definidas

Dentro del volcán Turrialba se definieron tres diferentes microcuencas (cuadro 12), identificadas como cuenca noreste, cuenca central y cuenca suroeste, sobre las cuales se desarrollaron los respectivos balances hídricos, y a su vez, la cuenca central se subdividió en dos áreas.

Las diferentes áreas de la cima del volcán Turrialba, se establecieron principalmente según la variación de los parámetros vinculados al comportamiento granulométrico de los materiales y la presencia de mayor o escasa cantidad de vegetación. En la figura 52 se observan las áreas realizadas para el cálculo del presente balance hídrico.

Cuadro 12. Áreas definidas, cima del volcán Turrialba.

ÁREAS VOLCÁN TURRIALBA	
Nombre de áreas	**Áreas (m²)**
Área 1: Cráter Suroeste	75223,58
Área 2: Cráter Central	102186,00
Área 3: Cráter Central	310294,90
Área 4: Cráter Noreste	184803,12
ÁREA TOTAL	**672507,60**

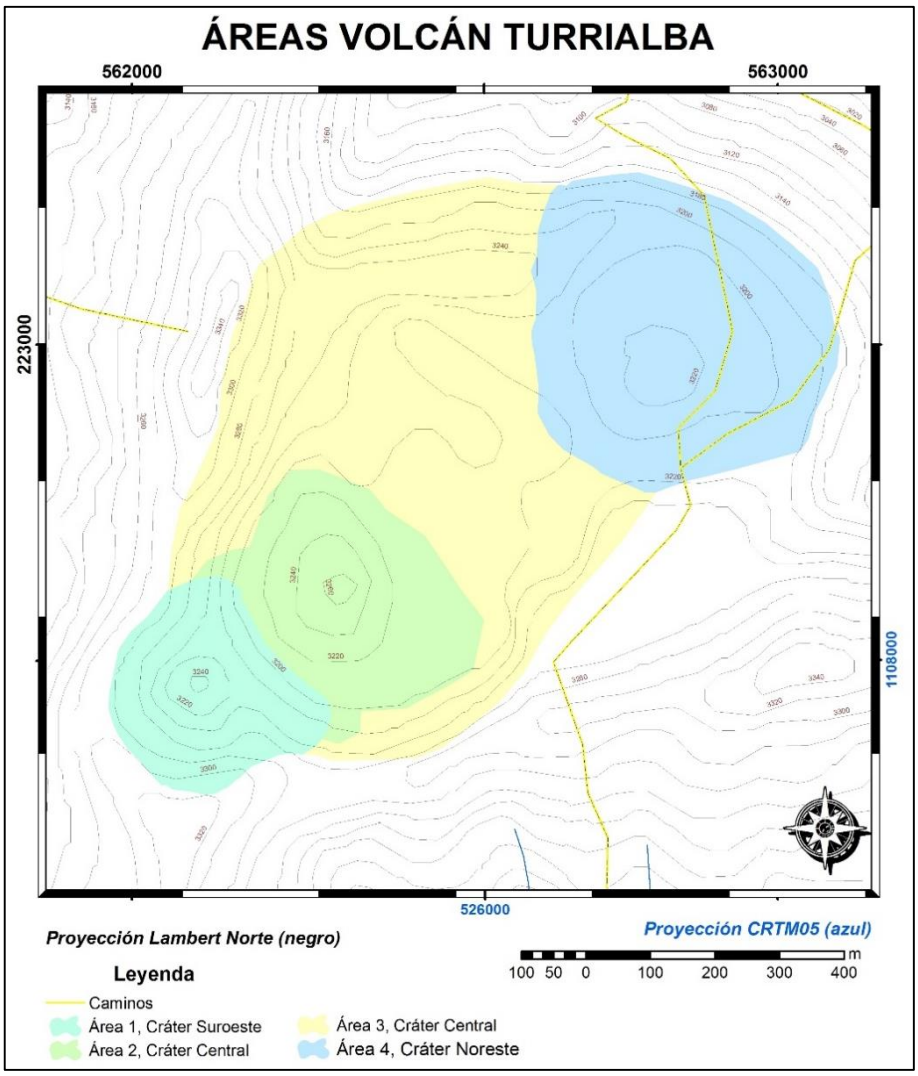


Figura 52. Áreas definidas, cima del volcán Turrialba.

b. Precipitación y temperatura de cuencas.

El Instituto Meteorológico Nacinal (IMN), brindó los datos disponibles para el período de estudio de la estación meteorológica más cercana a la cima del volcán Turrialba, correspondiente a la número 73143 ubicada en el área del mirador. Las coordenadas exactas de esta estación se muestra en el Anexo 5.

Algunos de los datos mensuales no tenían registro en la estación de interés, por lo cual se obtuvieron valores promedio del mes del año previo y posterior al de análisis. Sin embargo la mayoría de los meses contaban con registro de la información, además los valores promedio obtenidos se consideraron confiables, ya que se ajustaron al comportamiento promedio de las lluvias características en la zona.

En la figura 53, se puede observar como los meses con mayor precipitación en el volcán Turrialba, correspondieron con los últimos tres meses de cada año, mientras que los meses con menor precipitación resultaron ser enero, febrero, marzo y abril.

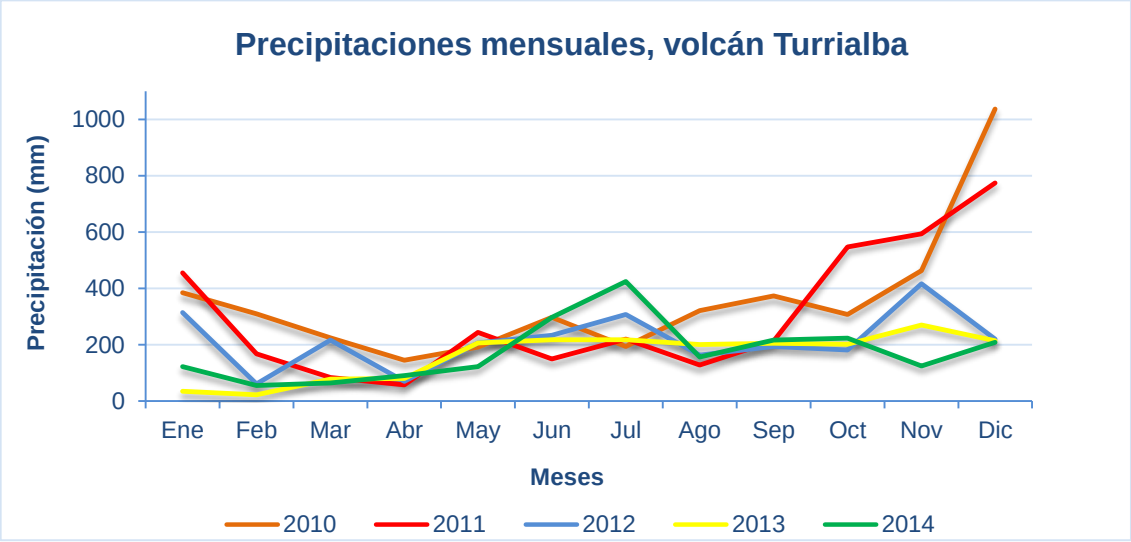


Figura 53. Precipitaciones mensuales de la estación del volcán Turrialba, período del 2010 al 2014. *Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.*

Para el desarrollo del balance hídrico se realizaron climogramas correspondientes a los períodos de interés (años 2011 y 2014).

En el período 2011, se observó que los meses más lluviosos, correspondieron con octubre, noviembre y diciembre, los cuales estuvieron acompañados por un descenso de temperatura media con respecto al mes de septiembre. Los meses con mayor y menor precipitación respectivamente son diciembre y abril, con valores entre 774,5 mm a 57 mm mensuales (figura 54).

Para el desarrollo del balance del año 2011, se analizaron los meses consecutivos en donde la precipitación que infiltró en la zona, superó la evapotranspiración potencial, asignándole al mes siguiente el valor de capacidad de campo correspondiente. De esta forma, los meses en que se cumplió la situación expuesta anteriormente, correspondieron con: mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero, asignádole el valor de humedad incial al mes de marzo del 2011. La figura 56 corresponde con el mapa de distribución de precipitaciones para la cima del volcán Turrialba durante 2011.

Dentro del período de análisis del año 2014, se observó un descenso importante en la temperatura media registrada para los meses de noviembre y diciembre (figura 55), mientras que el mes de julio es el que reporta mayor precipitación con 424,2 mm de lluvia.

Entre junio y enero de 2014, se superó la precipitación infiltrada en las cuencas del volcán Turrialba, con respecto al valor de evapotranspiración potencial. Debido a esto, y de acuerdo con la metodología de Schosinsky (2006), al mes de febrero de 2014, se le asignó un valor de humedad incial, correspondiente al valor de capacidad de campo. Además es notable, la caída en el valor de precipitación en el mes de febrero, con respecto al mes anterior. El mapa de la figura 57 muestra la precipitación en esta parte del área de estudio durante 2014.

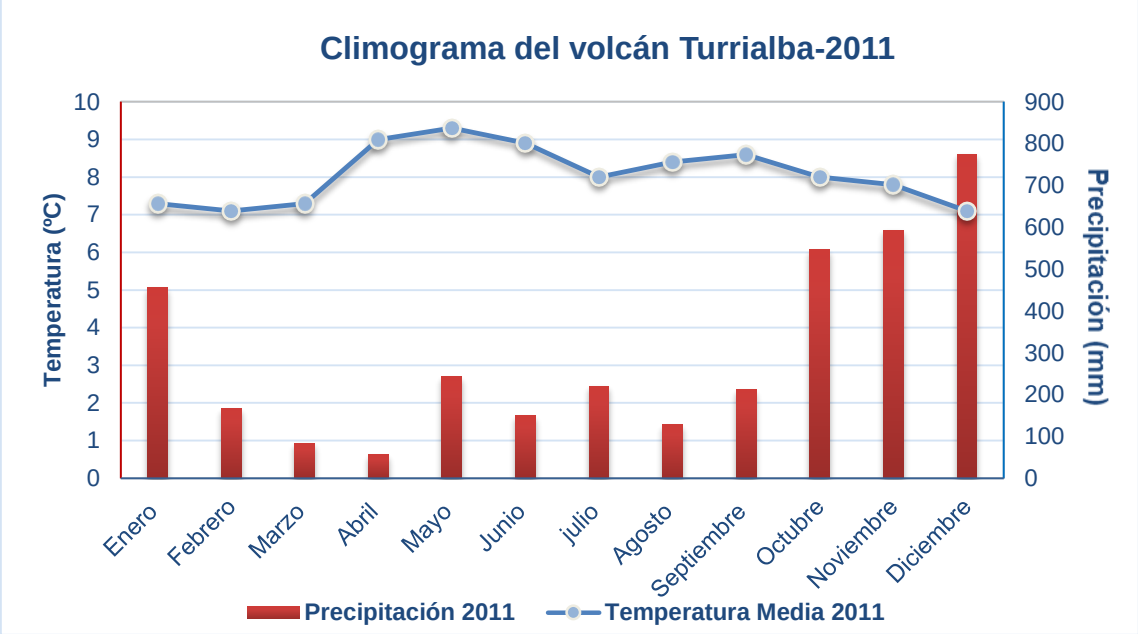


Figura 54. Climograma del año 2011, estación volcán Turrialba.

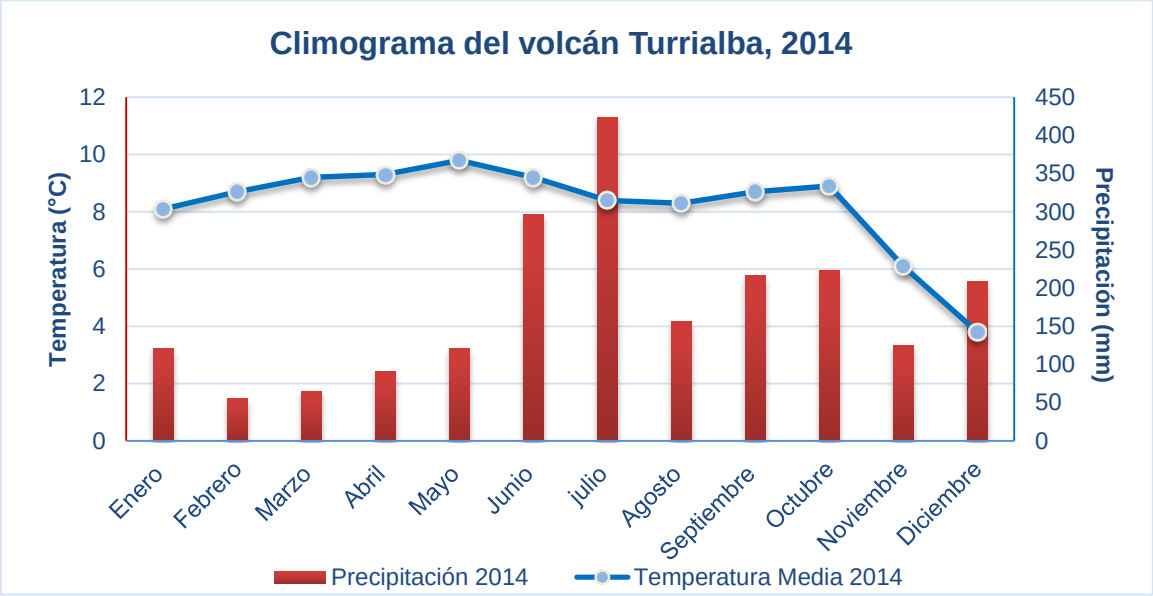


Figura 55. Climograma del año 2014, estación volcán Turrialba.

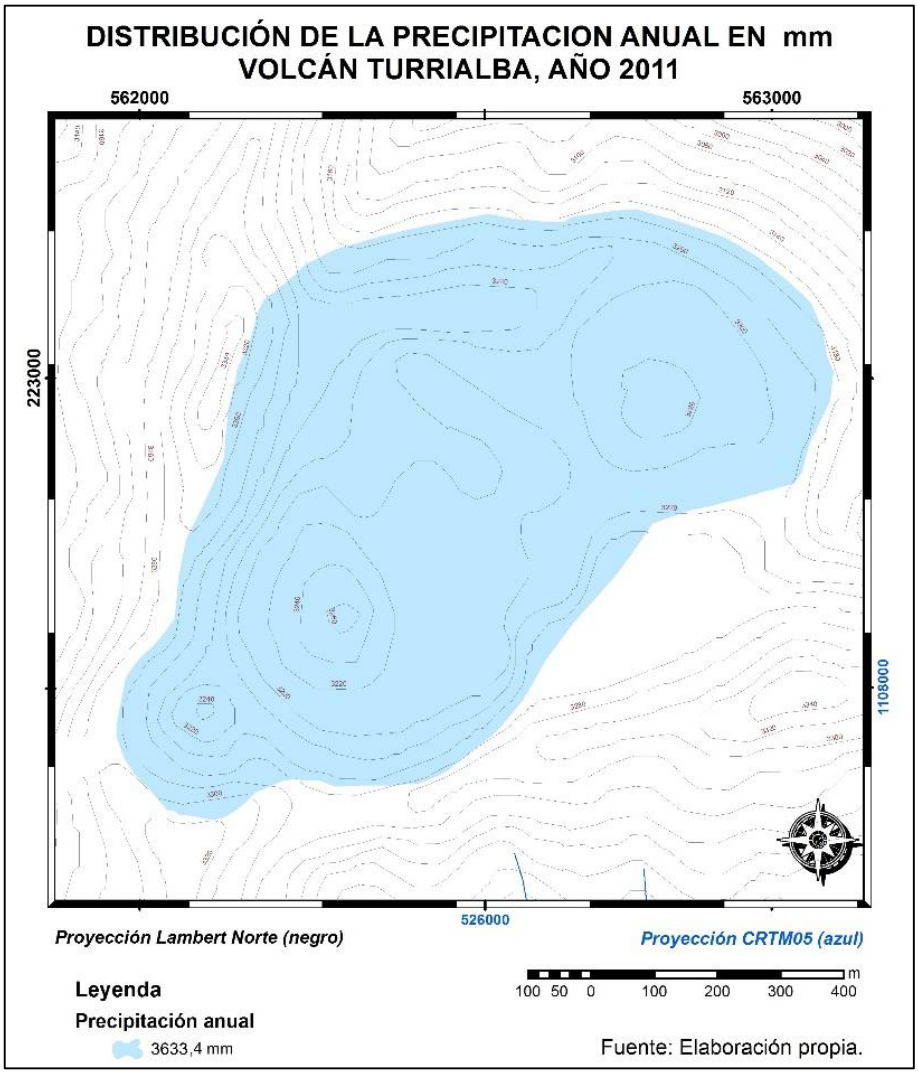


Figura 56. Mapa de precipitación para el período 2011, cima del volcán Turrialba.

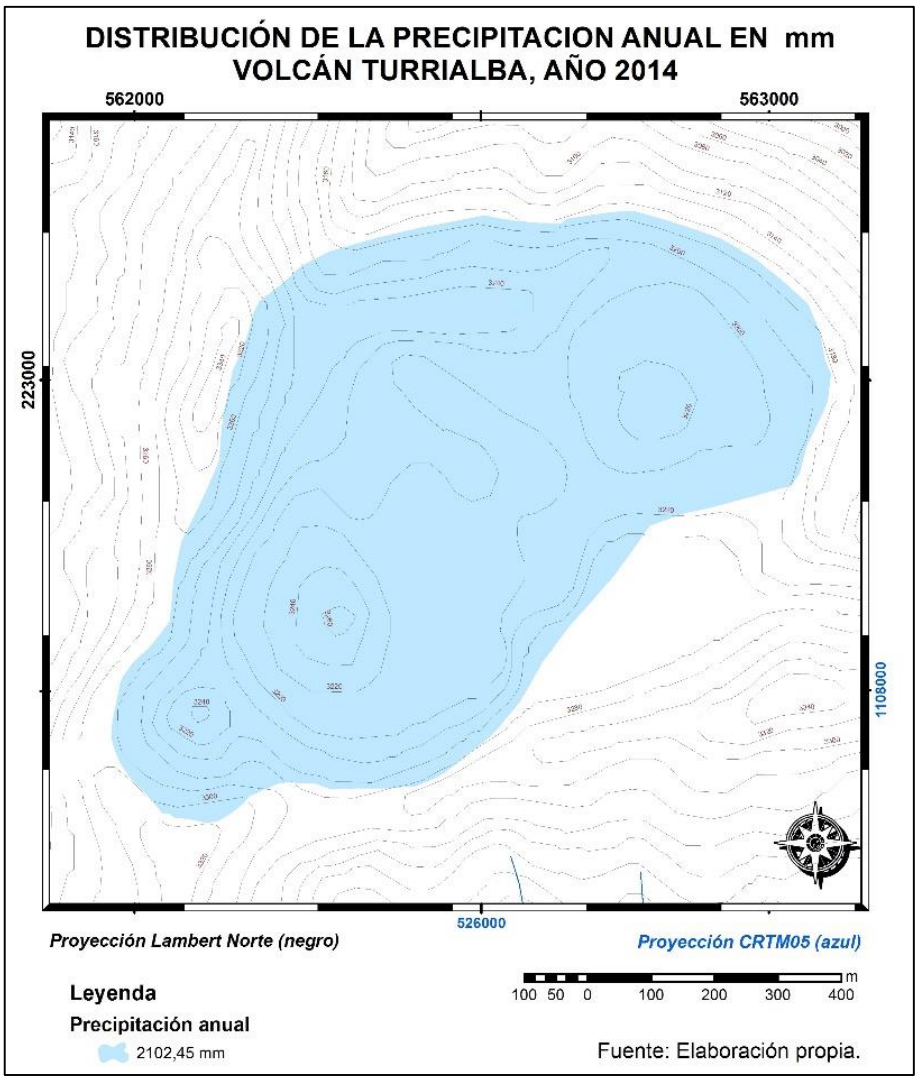


Figura 57. Mapa de precipitación para el período 2014, cima del volcán Turrialba.

c. Vegetación de cuencas

En la cuencas correspondientes al volcán Turrialba, se puede observar el desarrollo de vegetación de páramo, el cual representa un 45,6 % del total de la cuenca, sin embargo, esta se ha visto afectada por emanación de gases y materiales calientes que hace que en algunas épocas de mayor actividad, la vegetación desaparezca. Incluso en algunos sectores del año 2014, la misma se

encontraba en etapas iniciales de crecimiento y desarrollo, por lo cual resultó poco evidente la presencia de la misma.

Para las áreas donde se desarrolló el balance se asignaron valores de Kv entre 0,09 y 0,18, las cuales se aplicaron respectivamente en zonas donde existe zacate en menos de un 50%, y para zonas con vegetación tipo páramo (anexo 5)

En el caso del volcán Turrialba, se aplicó un valor Kv=0,09, para todas las áreas, asumiendo que existe escasa influencia de la vegetación, ya que prácticamente el terreno se encontraba con un zacate muy bajo y escaso. A excepción de las áreas número 3 y 4, donde la vegetación se observó un poco más desarrollada, por lo que se le asignó el valor de Kv=0,18 (páramo).

La profundidad de las raíces en la zona de estudio, según las observaciones y mediciones de campo, variaron entre 7 cm a 10 cm, y las mismas presentaron espesores milimétricos en su mayoría. En la figura 58, se observa el tipo de vegetación tipo páramo predominante en esta parte del área de interés.

Schosinsky (2006), indica que para efectos de un balance hídrico, se debe asignar un coeficiente de retención del follaje, adimensional y denominado como Cfo, determinando que: para bosques muy densos Cfo es igual a 0,20, mientras que para otro tipo de follajes se debe asignar un valor de Cfo igual a 0,12, último valor correspondiente al asignado a toda el área de estudio del volcán Turrialba. En el mapa de la figura 59, se muestra la distribución de las zonas con vegetación, así como el valor de Kv asignado para cada sector.

Figura 58. Vegetación Páramo en el cráter Noreste del volcán Turrialba.

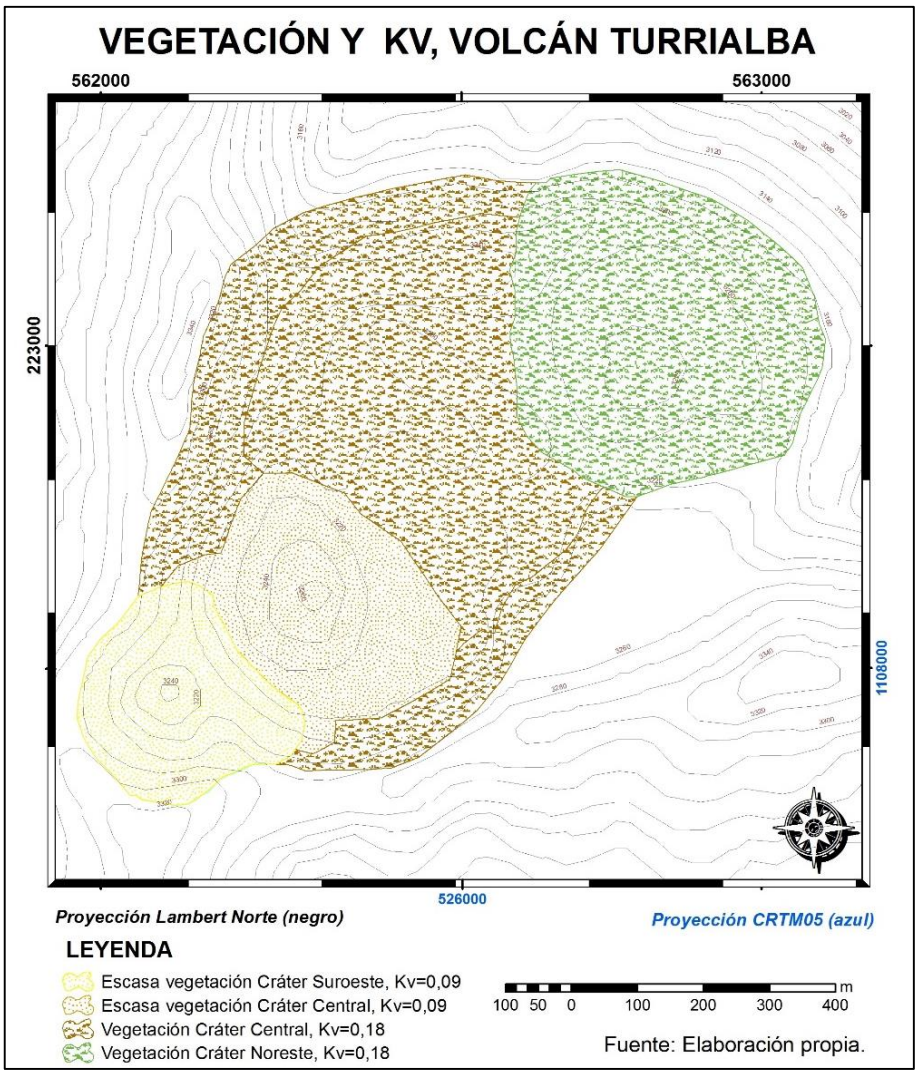


Figura 59. Distribución de la vegetación y valor Kv asociado en la cima del volcán Turrialba.

d. Infiltración

Debido a la actividad eruptiva ocurrida en el volcán Turrialba, las pruebas de infiltración en el campo, no se lograron realizar en la cima de este volcán, por lo cual se tomaron los datos de infiltración en el área de estudio del volcán Irazú, basandose en similitudes encontradas entre los resultados de los ensayos granulométricos para ambos volcanes.

Lo anterior bajo el supuesto de que los valores de permeabilidad son similares para muestras con comportamientos granulométricos similares, y partiendo del hecho de que en ambos casos se trata de materiales volcánicos, con comportamientos semejantes también en cuanto a, la composición, textura, profundidad de las raíces, etc.

Para la asignación de valores de infiltración en las áreas definidas en el volcán Turrialba, se definió lo siguiente en cada caso:

Para el caso de las áreas del volcán Turrialba número 1 y número 2, en presencia de materiales arenosos, clasificados como SP (arena pobremente gradada), se asignó un valor de infiltración de 43312,2 mm/día, resultado obtenido del promedio de valores de infiltración realizado sobre materiales clasificados como SP, en el volcán Irazú.

En el área número 3, donde predominaron los materiales arenosos, clasificados como SP (arena pobremente gradada), y como SW-SM (arena bien gradada con limos) o SP-SM (arena mal gradada con limos), se asignó un valor de infiltración de 34502,82 mm/día, resultado del promedio de los valores de infiltración obtenidos y realizados sobre materiales clasificados como SP, SW-SM o SP-SM en el volcán Irazú.

Finalmente, para el área número 4, debido a la presencia comprobada de depositos arenosos, clasificados como SM (arena limosa), se asignó un valor de infiltración de 7623,09 mm/día, resultado del promedio de los valores de infiltración obtenidos y realizados sobre materiales clasificados como SM en el volcán Irazú. Los valores de infiltración correlacionados se presentan en el cuadro 13, mientras que en la figura 60 se indican los valores de infiltración del volcán Irazú asignados para cada zona del volcán Turrialba, según las características granulométricas de cada una.

En la figura 61 se muestra la distribución de las velocidades de infiltración dentro del área de estudio de la cima del volcán Turrialba.

Cuadro 13. Resultados de las pruebas de infiltración realizadas en la cima del volcán Irazú, utilizadas para determinar la permeabilidad del suelo en cada área delimitada en la cima del Turrialba, con base en las similitudes granulométricas.

Arenas con mala gradación (SP) del volcán Irazú	
Número Muestra	**Valor de infiltración (cm/h)**
15.00	264,00
18.00	99,47
27.00	262,67
28.00	95,73
Valor promedio en cm/hora	**1804675,00**
Valor promedio en mm/día, aplicado a las áreas número 1 y 2 del volcán Turrialba.	**43312,20**
Arenas bien gradadas con limos (SW-SM) y arenas mal gradadas con limos	
Número Muestra	**Valor de infiltración (cm/h)**
12.00	42,00
16.00	165,33
20.00	171,33
25.00	88,67
26.00	67,95
Valor promedio en cm/hora	**107056,00**
Valor promedio en mm/día	**25693,44**
Valor promedio en mm/día, aplicado al área número 3 del volcán Turrialba.	**34502,82** (valor promedio de los dos anteriores)
Valor promedio de infiltraciones para suelos (SM) volcán Irazú	
Número Muestra	**Valor de infiltración (cm/h)**
2.00	8,47
5.00	15,07
9.00	5,07
11.00	11,80
19.00	85,33
22.00	44,67
23.00	51,93
29.00	3,87
31.00	63,73
Valor promedio en cm/hora	**32,22**
Valor promedio en mm/día aplicado al área número 4 del volcán Turrialba.	**7731,73**

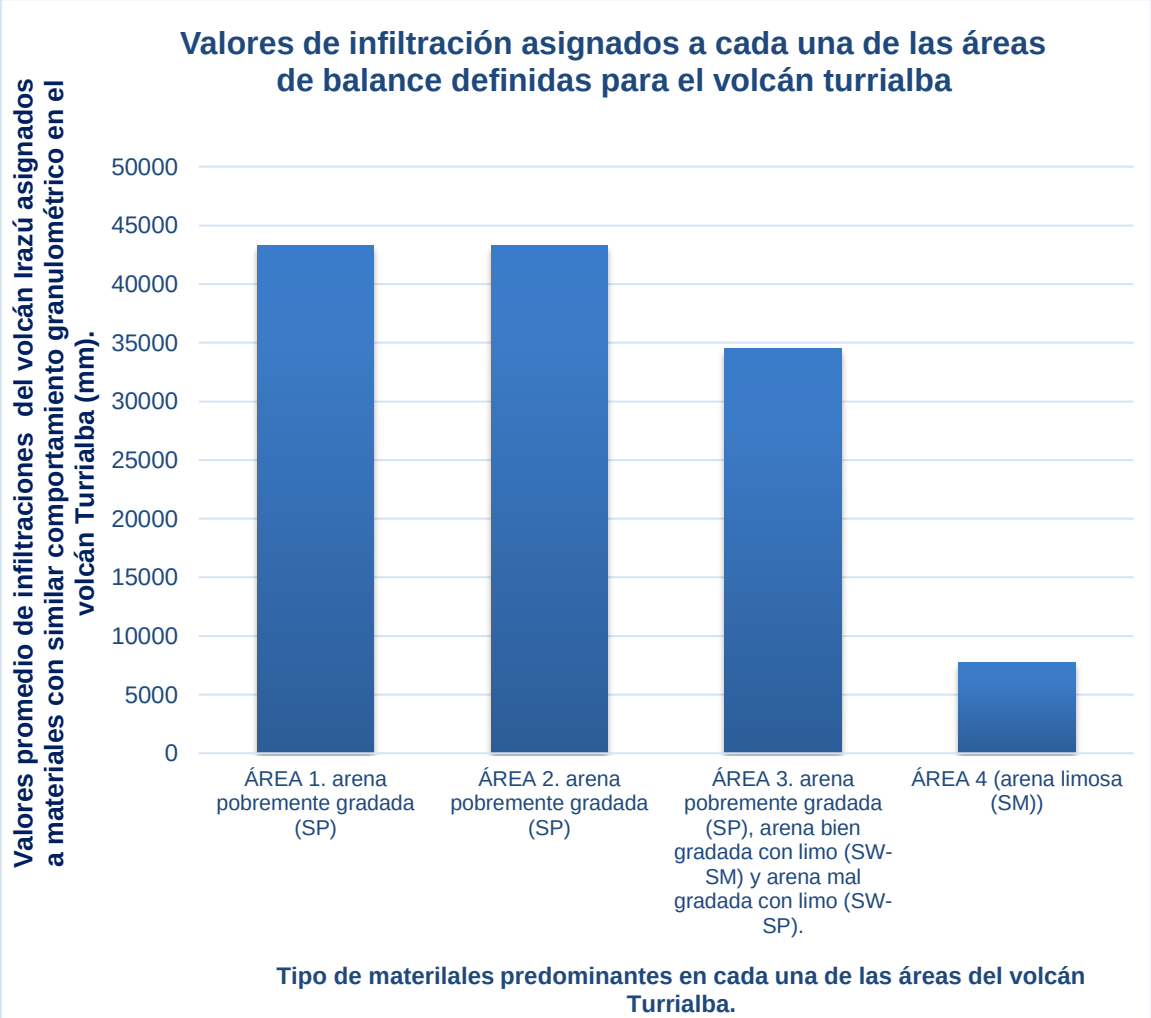


Figura 60. Valores de infiltración asignados a cada una de las áreas de balance definidas para el volcán Turrialba.

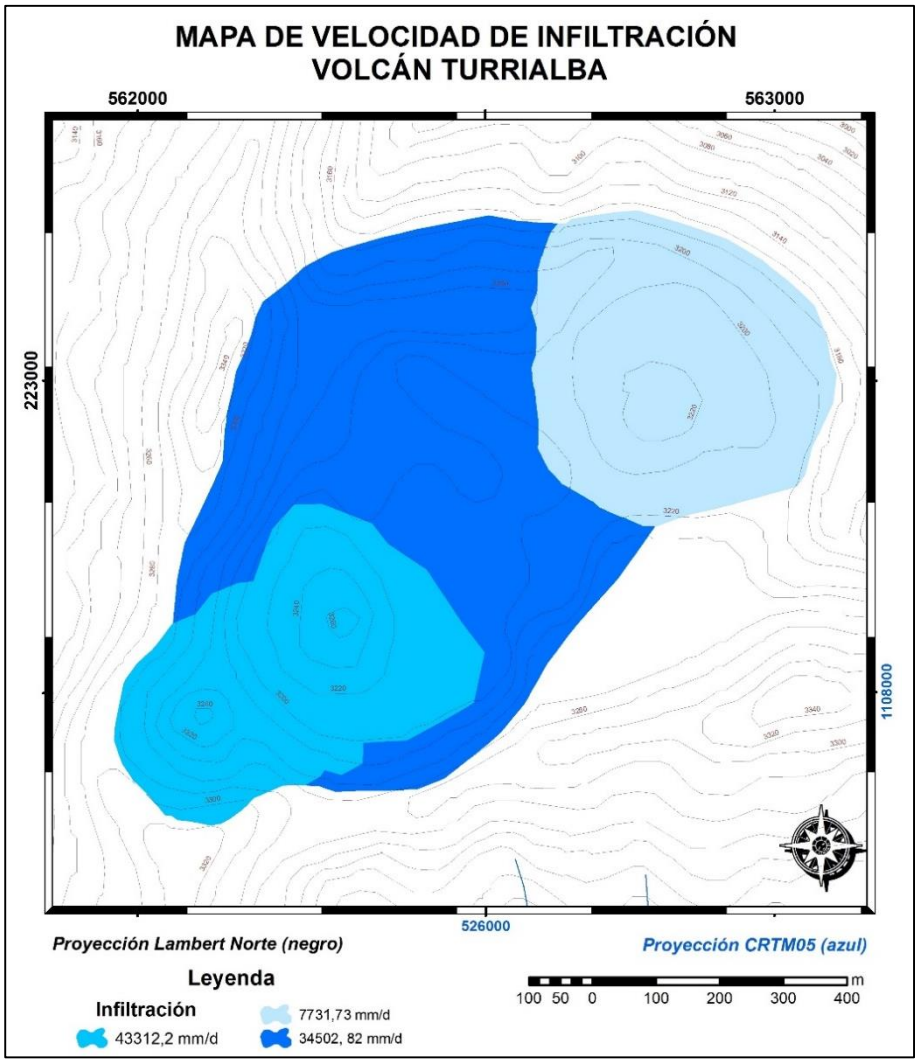


Figura 61. Mapa de la velocidad de infiltración para la cima del volcán Turrialba.

e. Pendientes

Las pendientes características en las diversas cuencas que conforman la cima del volcán Turrialba, son por lo general pendientes fuertes mayores a un 7%, para lo cual Schosinsky & Losilla (2000), determinaron que para el parámetro Kp en estos casos se deberá asignar un valor de 0,06, mismo valor aplicado a todas las áreas del volcán Turrialba. Tomando en cuenta además que al asignar otros valores no se influye en los resultados del balance como tal.

El mapa de pendientes de la cima del volcán Turrialba, se realizó con base en un modelo de elevación digital Aster GDem, con una resolución de 30 m, donde las pendientes se clasificaron por porcentaje para el área de estudio, según los valores de Schosinsky & Losilla (2000). A partir de estos, se obtuvo que en las zonas estudiadas, únicamente se presentaron pendientes con valores superiores al 1,1%, predominando en casi toda la totalidad del área de estudio, pendientes mayores a un 7% (figura 62).

En el cuadro 14, se muestran los rangos de pendientes presentadas en el área de estudio, y el área que abarca dentro de la zona de estudio del volcán Turrialba.

Cuadro 14. Valores de pendientes y Kp asociados asignados al volcán Turrialba, en los rangos requeridos para la metodología.

Volcán Turrialba				
Tipo de pendiente	**Pendiente (%)**	**Pendiente (°)**	**Kp**	**Área (m^2)**
Plana	1%-2%	0,57293°-1,14576°	0,15	2181
Moderada	2%-7%	1,14576°-4°	0,10	20589
Fuerte	mayor de 7%	> 4°	0,06	631071

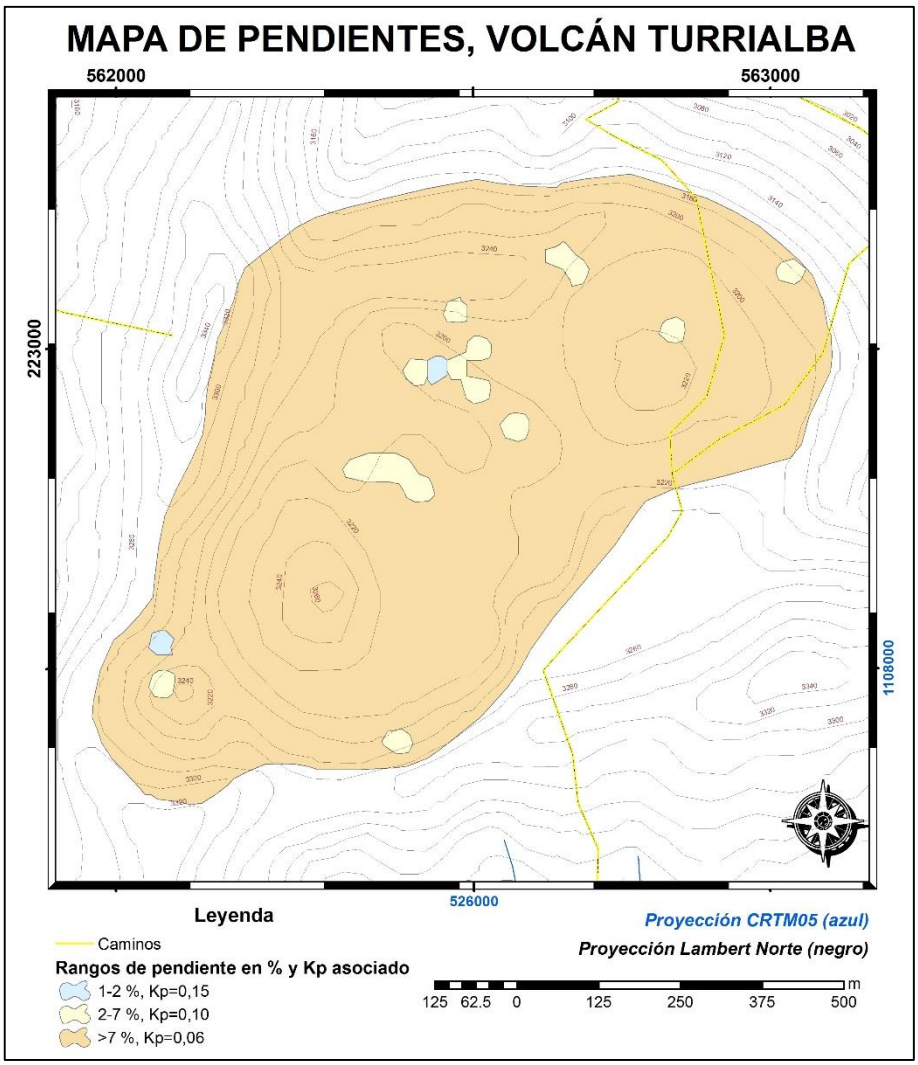


Figura 62. Mapa de pendientes (en porcentaje) de la cima del volcán Turrialba y Kp asociado.

f. Capacidad de campo y punto de marchitez

Para la asignación de estos valores a las áreas definidas dentro de la cima del volcán Turrialba, se emplearon los valores de capacidad de campo y punto de marchitez obtenidos para los suelos del volcán Irazú, realizando una correlación entre muestras con comportamientos granulométricos similares para ambos volcanes.

En las áreas número 1 y 2 del volcán Turrialba, donde predominaron los materiales arenosos clasificados como SP (arena pobremente gradada), se asignaron valores de capacidad de campo y punto de marchitez respectivamente de 17,32 % y 13,28%, resultado obtenido para los suelos SP en el volcán Irazú.

Para el caso del área número 3, en presencia de materiales clasificados como SP (arena pobremente gradada) y como SW-SM (arena bien gradada con limo), o SP-SM (arena mal gradada con limo), se asignaron valores de capacidad de campo y punto de marchitez promedio respectivamente de 18,42 % y 13,78 %, resultado promedio obtenido para los suelos clasificados como SP, SW-SM en el volcán Irazú.

En el área número 4, donde lo que abunda son los materiales clasificados como SM (arena limosa), se asignaron valores de capacidad de campo y punto de marchitez respectivamente de 22,45% y 15,89%, resultado obtenido para los suelos SM en el volcán Irazú.

Los valores de capacidad de campo y punto de marchitez para las muestras recolectadas en el volcán Irazú, mostrados en el cuadro 5, se obtuvieron mediante el análisis en laboratorios del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

g. Evapotranspiración

Para el cálculo de evapotranspiración en el volcán Turrialba, se utilizó la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972), y los valores de porcentaje de horas de luz solar mensual para la latitud 10º, del hemisferio norte correspondiente a la

ubicación de Costa Rica, esto según (Calvo, 1999). Los valores de evapotranspiración obtenidos para los años 2014 y 2011 en el volcán Turrialba, se presentan en los cuadros 15 y 16, donde: ETP= Evapotranspiración potencial (mm/mes), T= Temperatura media mensual (°C), Ps= Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año.

Cuadro 15. Evapotranspiración para el volcán Turrialba, 2014.

	Mes											
	Ene	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
Ps	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10
T	8,10	8,70	9,20	9,30	9,80	9,20	8,40	8,30	8,70	8,90	6,10	3,80
ETP	96,15	90,40	104,21	103,60	111,08	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77

Cuadro 16. Evapotranspiración para el volcán Turrialba, 2011.

	Mes											
	Ene	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
Ps	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10
T	7,30	7,10	7,30	9,00	9,30	8,90	8,00	8,40	8,60	8,00	7,80	7,10
ETP	93,15	84,90	96,82	102,45	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06

h. Densidad

La asignación de valores de densidad para los materiales del volcán Turrialba, se realizó mediante el valor promedio de los resultados de densidad obtenidos en los suelos del volcán Irazú (cuadro 17), bajo los siguientes criterios:

En las áreas número 1 y 2, se asignó un valor de densidad de 1,65 g/cm³, valor promedio obtenido de los suelos clasificados como SP (arena pobremente gradada) del volcán Irazú. Para el área número 3, se asignó un valor de densidad de 1,59 g/cm³, promedio de los suelos clasificados como SP (arena pobremente gradada) y como SW-SM (arena bien gradada con limo), o SP-SM (arena mal gradada con limo), en el volcán Irazú. En el área número 4, el valor de densidad asignado fue de 1,37 g/cm³, resultado promedio obtenido para los suelos SM en el volcán Irazú. La distribución de estas áreas se muestra en la figura 63.

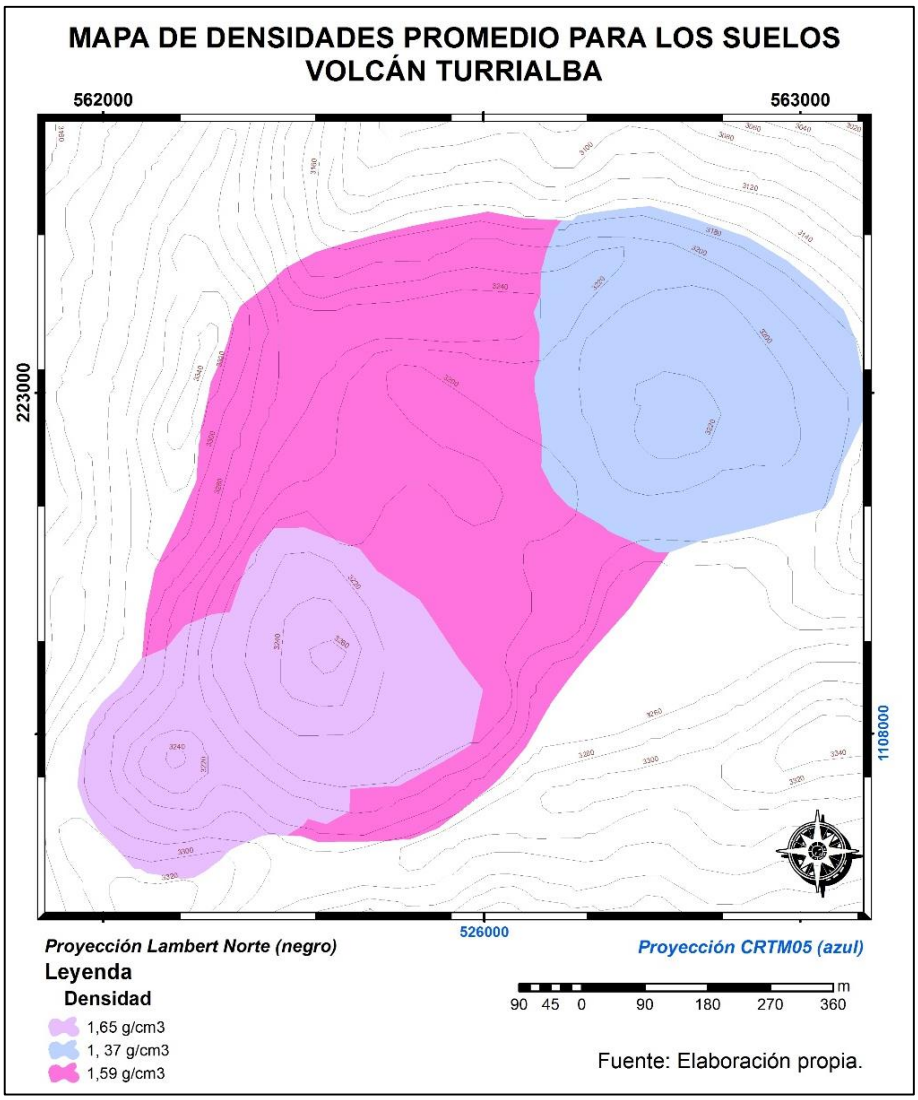


Figura 63. Mapa de densidad promedio de suelos en la cima del volcán Turrialba.

i. Comportamiento granulométrico de los materiales geológicos superficiales en la cima del volcán Turrialba.

Los materiales que componen las cuencas dentro del área de análisis del volcán Turrialba, son principalemente arenas medias, con presencia relativamente escasa de finos correspondientes a limos y arcillas, y en rango porcentual entre 0,7% a un 13,2 % (Cuadro 18), mientras que el porcentaje de material grueso

correspondientes a gravas, se presentaron entre un 33% y 0,6%, a excepción de un sector donde predominó el material correspondientes a gravas ubicado en el borde este del cráter central (correspondiente con la muestra 3), la cual presentó gravas en un porcentaje mayor a 50%, por lo cual la muestra resultó clasificada como un suelo de grano grueso correspondiente con una grava pobremente gradada.

Los materiales arenosos del volcán Turrialba presentaron variabilidad en la cantidad porcentual de finos presentes en las muestras, por lo cual se procedió a la clasificación de los mismos siguiendo la norma ASTM D2487-11, obteniendo una variación de suelos correspondientes con:

Arenas pobremente gradadas clasificadas como SP.

- ✓ Arenas, bien gradadas, con limos clasificadas como SW-SM.
- ✓ Arenas mal gradadas, con limos clasificadas como SP- SM.
- ✓ Arenas limosas clasificadas como SM.

En el Anexo 12, se presentan todas las curvas granulométricas del volcán Turrialba, asi como otros detalles de las muestras analizadas.

Algunas de las muestras procesadas en LANAMME, requirieron del análisis en laboratorio de límites de Atterberg e índice de plasticidad para obtener una clasificación final de las mismas.

Se obtuvo que, para las muestras analizadas correspondientes a la cima del volcán Turrialba presentaron valores promedio de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad correspondientes respectivamente con: 42,57 %, 36,43% y 6,13, (Anexo 13), determinando así que las muestras que presentaron baja plasticidad. Sin embargo, la mayoría de las muestras no presentaron plasticidad, predominando el material arenoso-limoso ante el componente arcilloso. La clasificación detallada de las muestras analizadas con base en su comportamiento granulométrico se presenta en el Anexo 9.

En el cuadro 17 se resumen los resultados de los ensayos granulométricos realizados a las muestras recolectadas en el volcán Turrialba, mientras que la figura

64 muestra la ubicación de esas muestras y la distribución de los tipos de suelo en esta parte del área de estudio. El mapa con la delimitación de las clasificaciones de suelo dentro del área de interés, se muestra en la figura 65.

Cuadro 17. Resumen del comportamiento granulométrico y características de los materiales en el volcán Turrialba.

N° muestra	Arena	Gradación	Gravas (%)	Finos (%)	Plasticidad	Clasificación
1	**F**	(W)	33,0	12,4	B	SM
2	F	(W)	26,0	12,1	B	SM
3	G	(P)	50,4	4,8		GP
4	M	(W)	11,0	12,3	B	SM
5	F	(P)	0,1	4,5		SP
6	F	(W)	26,6	12,8	B	SM
7	F	(W)	28,1	13,2	B	SM
8	M	(W)	22,0	13,0	B	SM
9	M	(P)	30,3	4,5		SP
10	M	(W)	18,8	5,9	NP	SW-SM
11	F	(W)	29,1	6,1	NP	SW-SM
12	M	(P)	5,7	2,3		SP
13	M	(P)	6,1	2,8		SP
14	F	(P)	0,6	2,3		SP
15	G	(W)	28,4	9,2	NP	SW-SM
16	G	(W)	29,2	8,5	NP	SW-SM
17	M	(P)	22,5	2,6		SP
18	M	(P)	20,4	3,3		SP
19	F	(P)	6,9	5,4	B	SP-SM
20	F	(P)	7,7	4,9		SP
21	M	(P)	24,8	1,6		SP
22	M	(P)	29,9	3,3		SP
23	M	(W)	6,2	6,5	NP	SW-SM
24	M	(P)	2,5	0,7		SP
25	M	(P)	32,2	3,4		SP
26	M	(P)	30,2	5,0	B	SP-SM
27	M	(P)	28,8	5,2		SP-SM

En el cuadro 17, F= arena fina, M= arena media, G= arena gruesa, W= buena gradación, P=pobre gradación, B= baja plasticidad, NP= no presenta plasticidad,

SP=arena, GP=grava, SW-SM= arenas bien gradadas con limos SP-SM= arenas mal gradadas con limos, y SM=Arenas limosas.

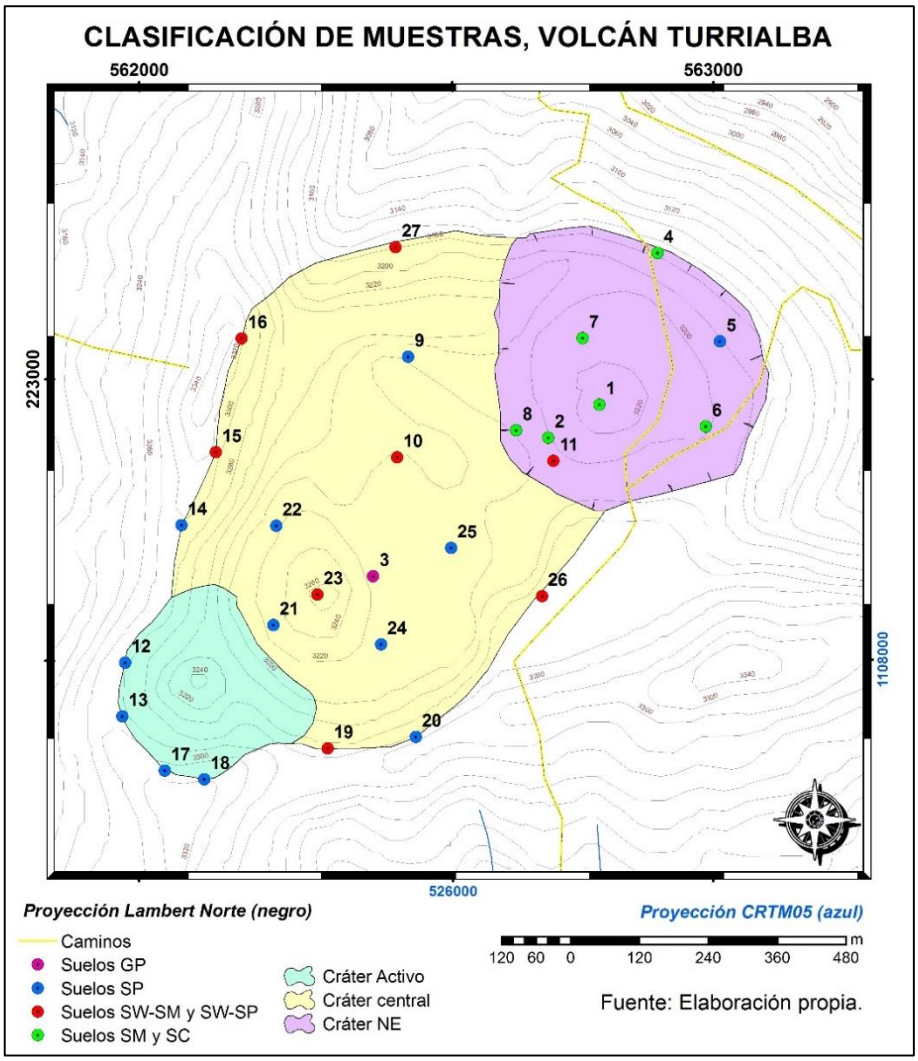


Figura 64. Clasificación de suelos en la cima del volcán Turrialba según la ubicación de las muestras.

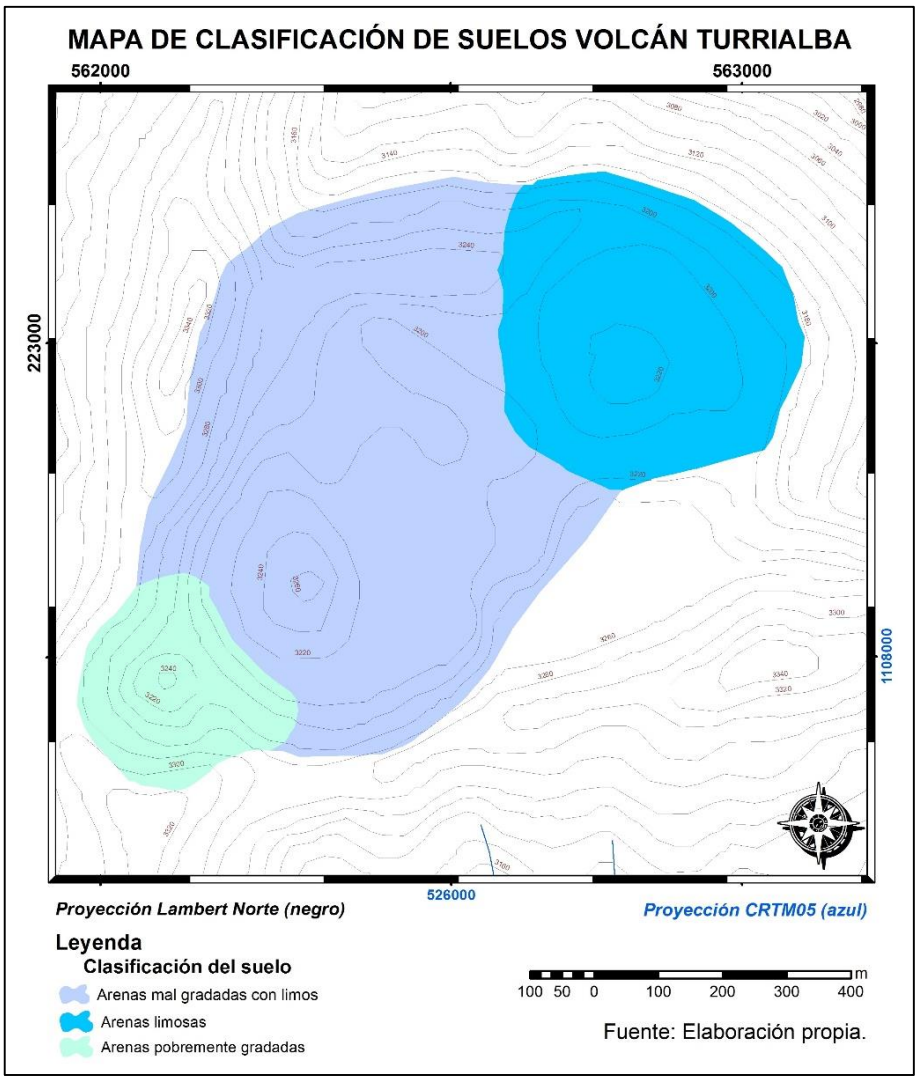


Figura 65. Mapa de distribución espacial promedio de los tipos de suelo en la cima del volcán Turrialba.

j. Descripción de los depósitos volcánicos Turrialba:

Genéticamente los materiales que se encuentran ubicados en superficie de las cuencas analizadas, no corresponden estrictamente con suelos, por lo cual la granulometría permitió obtener los tamaños de partículas presentes en los depósitos volcánicos recientes analizados y a su vez describir los porcentajes de

los componentes reales presentes, obteniendo así la siguiente descripción de los materiales del volcán Turrialba.

Los depósitos volcánicos ubicados en la cima del volcán Turrialba presentan una composición predominantemente andesítica, los mismos se componen principalmente de ceniza media a gruesa, en porcentajes entre un 54,6 % a 97,1%, con una coloración generalmente gris a café, acompañadas de material lapilli, y predominando las rocas escorias y andesita como tal, en rango de porcentajes entre 0,1% a 33%. En menor proporción se tiene la presencia de materiales correspondientes a cenizas muy finas, con porcentajes entre 0,7% a 13,2%.

k. Salida de agua del sistema en forma de vapor

Debido a la abundante desgasificación durante los períodos de balance realizados en los años 2011 y 2014 en la cima del volcán Turrialba, se procedió a determinar un aproximado de la salida de vapor de agua en el cráter activo del volcán Turrialba, a través de la siguiente ecuación, utilizada por Conde *et al.* (2014):

$$QH_2O = Z * QSO_2$$

Donde: $QH_2O=$ flujo del vapor de agua (toneladas/día), **$QSO_2=$** Flujo de dióxido de azufre (toneladas/día) y **$Z= ((H_2O/ SO_2,)$** El valor de la relación masa de agua entre la masa de dióxido de azufre en toneladas/día).

Para la determinación de las variables de esta ecuación se utilizaron:

1. Los resultados de mediciones de flujo del SO_2, obtenidas en Pacheco *et al*. (2014), durante el año 2014 para el período en que se realizó el balance hídrico donde se estimó un flujo aproximado de 500 toneladas diarias previo a la erupción de finales de octubre, y posterior a la misma se registró un aumento significativo y promedio correspondiente a 4000 toneladas diarias. Sin embargo el cálculo solo se aproximó a medir la desgasificación previa al desarrollo de las erupciones del año 2014.

2. Para el período 2011, (Fernández *et al* 2011 c y 2011 e) indicaron que las emisiones del SO_2 aumentaron, llegando a un valor promedio de 890 toneladas en los primeros meses del año 2011, mientras que los meses posteriores correspondientes a mayo y diciembre del 2011 estuvieron por debajo de las 500 toneladas. Por otro lado, Conde *et al*. (2014) registró un valor promedio de emisiones de SO_2 de 635 ± 621 toneladas por día. Todos los valores anteriores se promediaron obteniendo 675 toneladas diarias de SO_2 .

3. Mientras que el valor de Z=17, asumido para la relación de masa de H_2O/ SO_2, correspondió al indicado en Moussalam *et al*. (2014), en su tabla de relaciones de plumas de gas determinadas para el volcán Turrialba.

CALCULO 2014:

$$QH_2O = Z * QSO_2$$

$$QH_2O = 17 * 500 \text{ t/d}$$

$$QH_2O = 8500 \text{ t/d}$$

$$QH_2O = 3.102.500 \text{ t/año}$$

CALCULO 2011:

$$QH_2O = Z * QSO_2$$

$$QH_2O = 17 * 675 \text{ t/d}$$

$$QH_2O = 11475 \text{ t/d}$$

$$QH_2O = 4.188.375 \text{ t/año}$$

5.2.2 Resultados balance hídrico en el volcán Turrialba

En los Anexos 14 y 15, se presentan los cálculos realizados para los períodos 2011 y 2014, correspondientes a las áreas definidas en el volcán Turrialba. Mientras que en los cuadros 18 y 19 se presentan los datos de recarga potencial, así como las áreas y volumenes de recarga, calculados para cada microcuenca.

En la figura 66 se muestran las cuatro diferentes zonas de recarga definidas para el volcán Turrialba.

En la figura 67 se muestra el mapa de recarga potencial para 2011, mientras que la figura 68, se presenta el porcentaje de recarga potencial anual, representando el porcentaje de lluvia que logra recargar en cada zona. En algunos casos, se unificaron las zonas debido a que los datos obtenidos coincidieron.

En la figura 69 se muestra el mapa de recarga potencial para 2014, y en la figura 70, se muestra el porcentaje de recarga potencial anual, que recarga en cada zona para este período.

Cuadro 18. Volumen de agua del balance anual 2011, volcán Turrialba.

RECARGA POTENCIAL ANUAL-VOLCÁN TURRIALBA (2011)			
Cuenca	**Rp(mm)**	**Área (m²)**	**V (m³/año)**
Área 1, Cráter Suroeste	0,00	75223,58	0,00
Área 2, Cráter Central	2114,98	102186,00	216121,35
Área 3, Cráter Central	2114,97	310294,90	656264,40
Área 4, Cráter Noreste	2114,97	184803,12	390853,05

Cuadro 19. Volumen de agua del balance anual 2014, volcán Turrialba.

RECARGA POTENCIAL ANUAL-VOLCÁN TURRIALBA (2014)			
Cuenca	**Rp(mm)**	**Área (m²)**	**V (m³/año)**
Área 1, Cráter Suroeste	0,00	75223,58	0,00
Área 2, Cráter Central	859,88	102186,00	87867,70
Área 3, Cráter Central	841,68	310294,90	261169,01
Área 4, Cráter Noreste	836,07	184803,12	154508,35

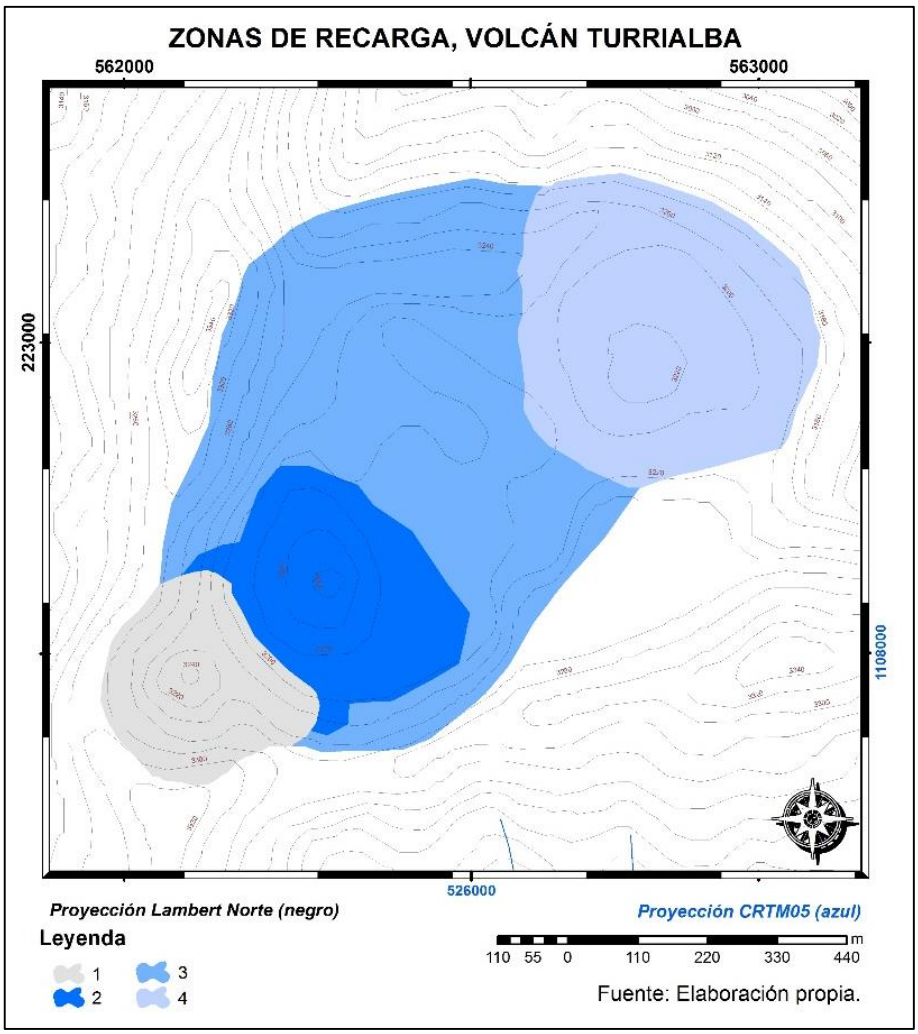


Figura 66. Zonas de recarga en la cima del volcán Turrialba, para ambos períodos 2011 y 2014.

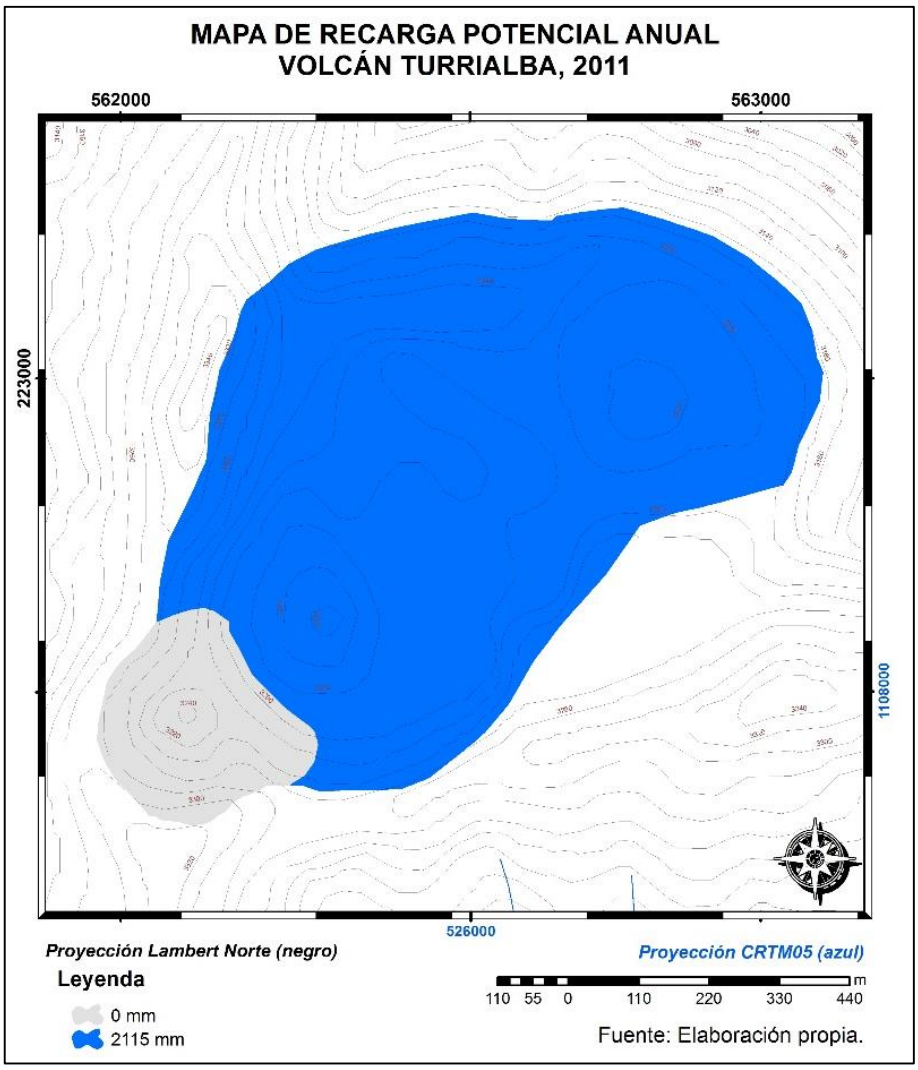


Figura 67. Mapa de recarga potencial anual para 2011, cima del volcán Turrialba.

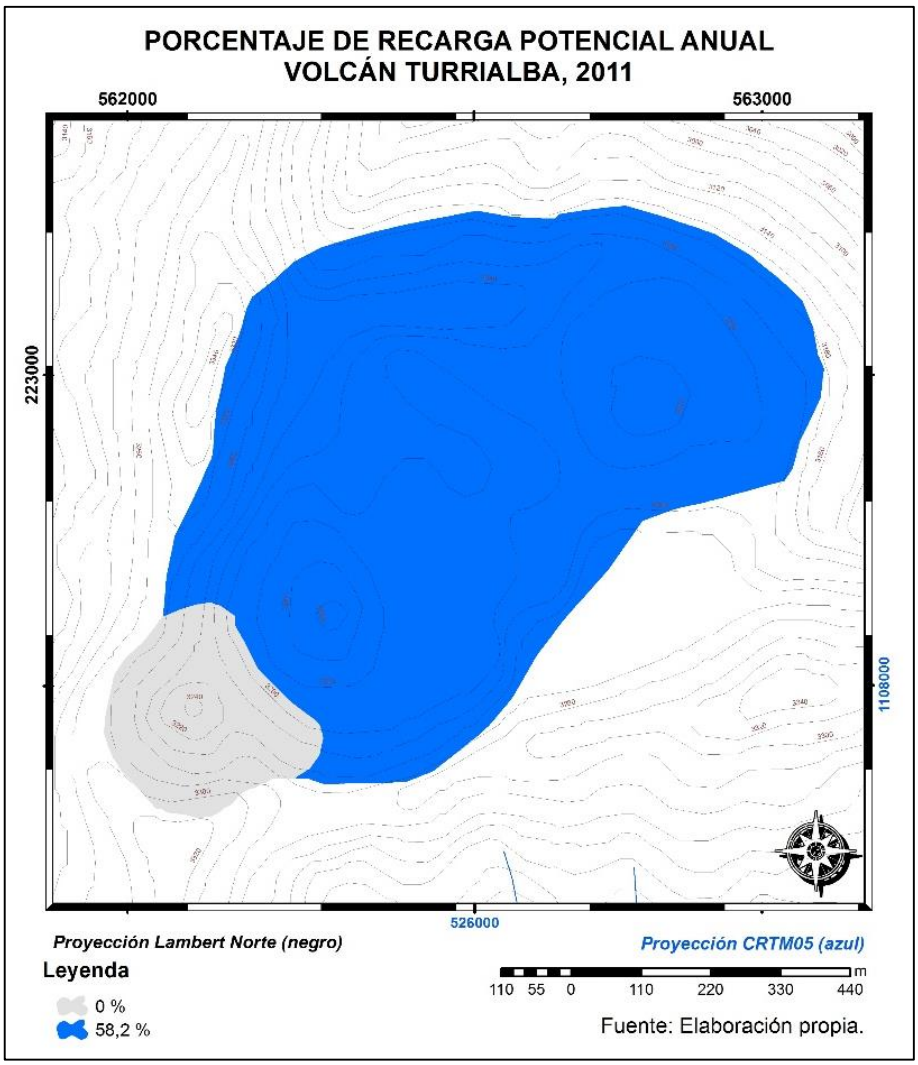


Figura 68. Porcentaje de lluvia que logró recargar en la cima del volcán Turrialba durante el periodo 2011.

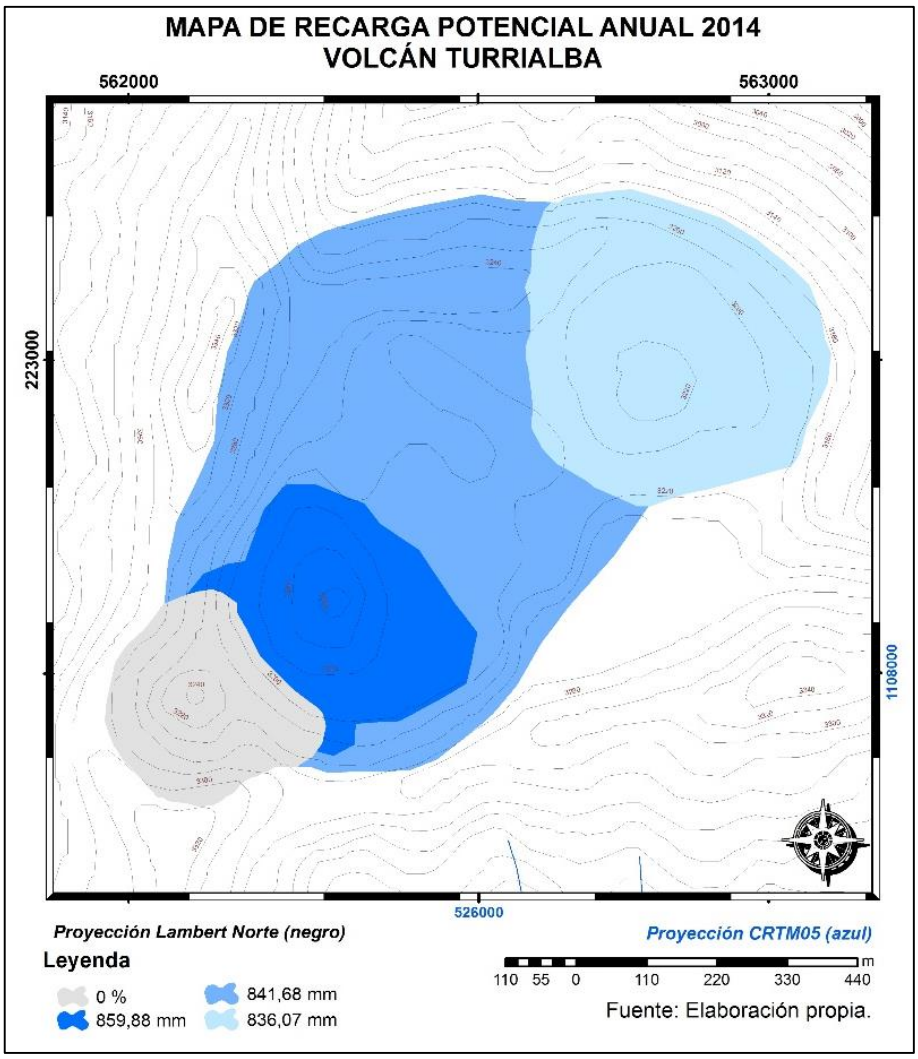


Figura 69. Mapa de recarga potencial anual para 2014, cima del volcán Turrialba.

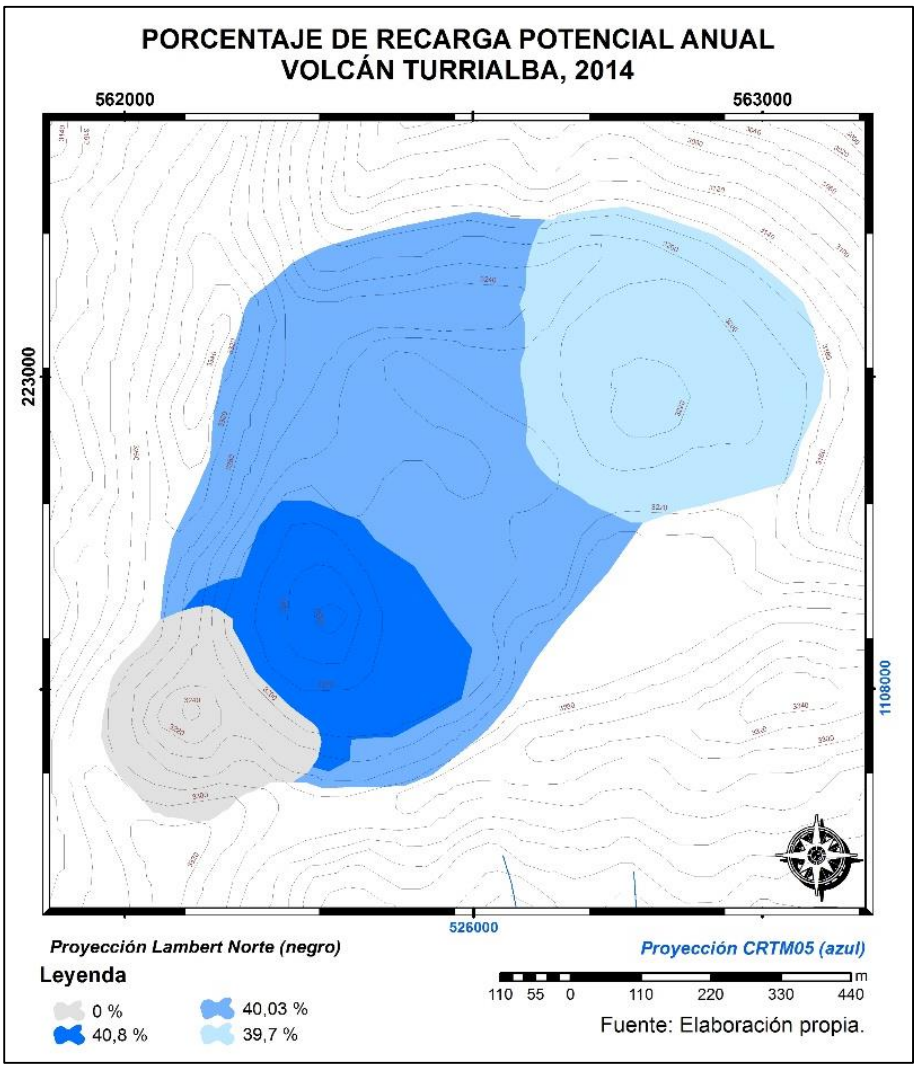


Figura 70. Porcentaje de lluvia que logró recargar en la cima del volcán Turrialba durante el período 2014.

6. ACTIVIDAD HIDROTERMAL

6.1 Antecedentes

Durante las últimas cuatro décadas, la actividad de estos volcanes, ha sido de monitoreada de forma independiente por vulcanólogos de instituciones como la Red Sismológica Nacional (RSN-UCR) y el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA). Además se han realizado campañas geofísicas, con sondeos de geo radar en el volcán Irazú, cuyos resultados se describen en Kruse *et al*. (2010) y Hudnut (1983). Estas dos investigaciones, tuvieron como objetivo, caracterizar una parte del subsuelo en la cima del macizo.

El tema de la hidrogeología en las cimas de los volcanes ha sido poco estudiado previamente. Se tiene conocimiento del análisis hidrogeoquímico de las aguas de la laguna Botos en el volcán Poás, donde se realizó un balance hídrico en la laguna (González *et al*. 2013a), lo cual marcó un precedente en la investigación hidrogeológica en las cimas de los volcanes. En otro estudio, se realizó el análisis del sistema de agua subterránea regional en el volcán Poás, y la probable descarga hacia la cuenca del Río Agrio (Sandford *et al*. 1995).

Existen temas desarrollados en ambientes volcánicos que se enfocan en sistemas hidrotermales y en la geoquímica. Tal es el caso del trabajo realizado por Hurwitz *et al*. (2007) o en la descarga de calor hidrotermal manejado por Ingebritsen *et al*., (2001) y Adams *et al*. (1990). Lee *et al*. (1997), han estudiado la evaporación y su relación con fuentes de calor, como las cámaras magmáticas y los fluidos hidrotermales. Weisman (1973), estudió la dinámica de un lago bajo condiciones atmosféricas inestables. Rouwet *et al*. (2004 y 2008), realizaron un balance de masa y un análisis de la dinámica hidrogeoquímica para el lago volcánico del volcán Chichón, en México.

De forma más general, autores, como Cruz, *et al*. (2008), han tratado el tema de los acuíferos volcánicos, y Ugolini *et al*. (2002), estudiaron como definir las propiedades hidrogeológicas de los distintos tipos de suelo volcánico.

A continuación se presenta el concepto de sistema hidrotermal y el análisis individual de los sistemas hidrotermales de ambos macizos volcánicos, mediante la investigación de información disponible de los datos más relevantes relacionados al tema y observaciones de campo.

6.2 Sistemas hidrotermales

Un sistema hidrotermal se define como un sistema de agua subterránea que presenta una fuente o área de recarga, una fuente o área de descarga y una fuente de calor. Cuando el magma transfiere o suministra la fuente de calor y volátiles (elementos o compuestos disueltos en un magma, que forman gas al ser sometidos a presiones y temperaturas relativamente bajas), el sistema hidrotermal se puede clasificar como sistema hidrotermal magmático (Sigurdsson *et al*., 1999).

6.2.1 Sistema hidrotermal del volcán Turrialba

El sistema hidrotermal que se mantiene en el volcán Turrialba, se ha caracterizado por ser muy activo desde el año 2001, y hasta la etapa del desarrollo del balance hídrico realizado en su cima en el año 2014, el mismo se ha visto reflejado predominantemente por: campos fumarólicos, lagunas efímeras en los cráteres, erupciones y flujos de azufre.

A continuación se exponen los antecedentes y lo observado en el período del año 2014.

Campos fumarólicos:

Desde la última fase eruptiva histórica del volcán Turrialba (1864-1866), los cráteres central y occidental han mostrado actividad fumarólica, con temperaturas que se han agrupado alrededor de los 90°C (Vaselli *et al.,* 2010), sin cambios o modificaciones importantes reportadas, situación que se tornó diferente partir del año 2001, Vaselli *et al* (2010), indicó un aumento de la actividad fumarólica en el volcán Turrialba, observando en los próximos años (2002, 2005 y 2008) un aumento en la cantidad y extensión de los mismos principalmente entre los cráteres central y suroeste, tanto en sus flancos interiores como los exteriores. Lo anterior coincide

con Hilton *et al., (*2010), quienes indicaron que en las fumarolas del volcán Turrialba se dieron importantes cambios evidenciados en un aumento de temperatura e intensidad y extensión de las mismas.

Dentro de los principales cambios o comportamientos en los campos fumarólicos en el volcán Turrialba, y detectados en (Vaselli *et al*., 2010), en el período 2001 al 2008 correspondieron con:

- Detección por primera vez de dióxido de azufre (2001).
- Descarga de fluidos (2005).
- Nuevas fracturas (2005 y 2008).
- Mayor aumento global de emisiones de las fumarolas (2007).
- Aumento en la concentración de dióxido de azufre (2003 al 2008).
- Gases ácidos que emanaron de los campos fumarólicos que dañaron la vegetación (2008)

El proceso de ampliación de los campos fumarólicos, siguió ocurriendo posteriormente, generándose nuevos boquetes o sectores de desgasificación, principalmente los ocurridos en enero del 2010 y enero del 2012 (González *et al*., 2015).

En la figura 71, se muestran las recopilaciones de temperaturas máximas y mínimas para las fumarolas del volcán Turrialba (RSN 1987b; 1988 a; 1988 b; 1989: 1991; 1995; 2001; 2002 a; 2012; 2013 c; 2013 d; González *et al.,* 2014, Fernández *et al.*, 2011 a y 2011 d).

Nótese que no se presentó una variación importante de temperaturas en el siglo XX, manteniéndose generalmente entre 80°C y 90°C. Sin embargo en el año 2005 se dio un leve aumento de 2°C, hasta registrarse en 2014 temperaturas de hasta 725 ° C. Para el año 2010, cuando el volcán inició en una nueva etapa con erupciones freáticas (González *et al*., 2015), se notó también, un importante aumento de temperatura con respecto al año anterior.

Las mediciones de campos fumarólicos del volcán Turrialba se han mantenido registrados desde el siglo XX, con mediciones de menor frecuencia a la actual y no fue, sino hasta el año 2013, donde los datos de temperatura se recopilaron con una periodicidad por lo general mensual.

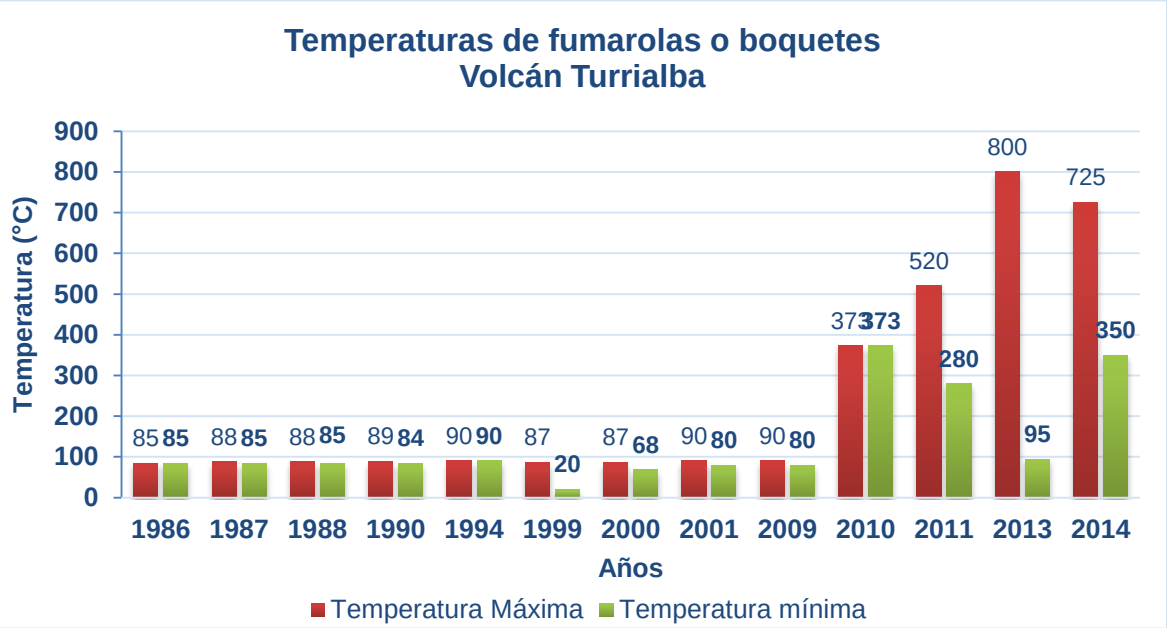


Figura 71. Temperaturas en fumarolas del volcán Turrialba.

Durante el período de análisis correspondiente al año 2014, los principales campos fumarólicos observados en el volcán Turrialba, se ubicaron en las paredes interna sur y externa noreste (ahora desaparecida, figura 72) del cráter suroeste, en la periferia de los boquetes I-2010 y I-2012. En estos sectores fueron evidentes los aumentos de temperatura durante el período de análisis del año 2014. Y como hecho destacable, tenemos que el 30 de octubre, se registraron temperaturas en los Boquetes I-2010 y I-2012 de 500°C y 725°C, respectivamente (Figura 73). Estas temperaturas precedieron una erupción ocurrida ese mismo día. En la figura 74 se muestra un esquema que representa el sistema magmático hidrotermal del volcán Turrialba.

Figura 72. Antigua pared externa noreste del cráter Suroeste.

Los campos fumarólicos del volcán Turrialba, se han caracterizado por presentar una continua desgasificación de variable intensidad con emanaciones principalmente de CO_2 , H_2 , H_2 S, SO_2 , H_2 O, HCl y HF y sobre todo vapor de agua, incandescencia visible en las noches por las anomalías térmicas, además se han observado depósitos de azufre nativo y otras sales indeterminadas (RSN, 1986).

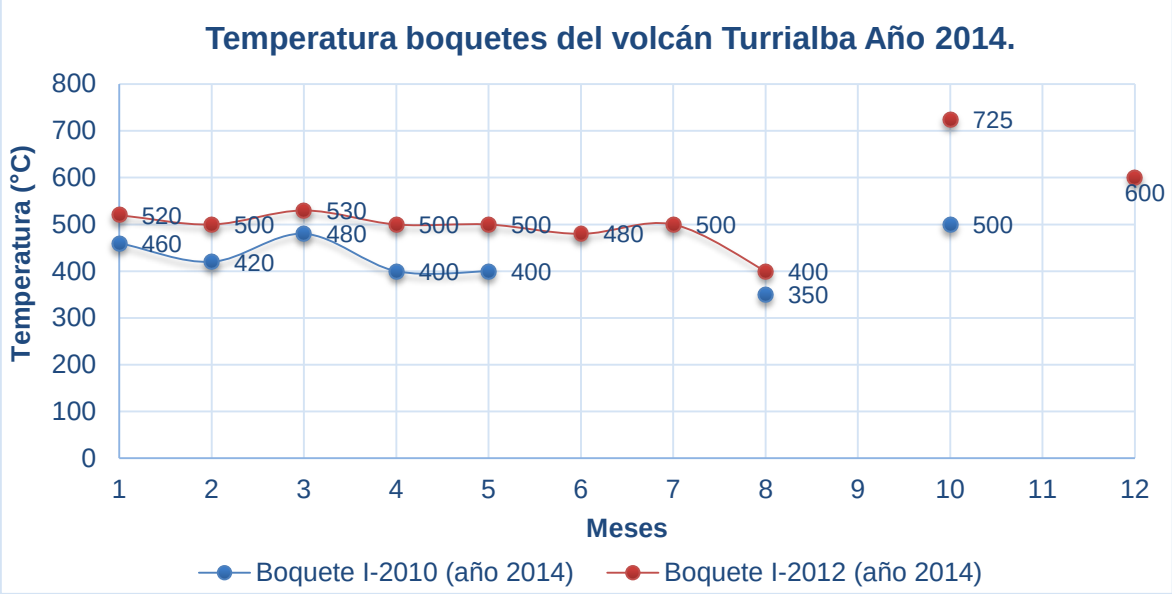


Figura 73. Temperatura de las bocas intracratéricas del volcán Turrialba en el año 2014. Fuente: González *et al.*, 2015.

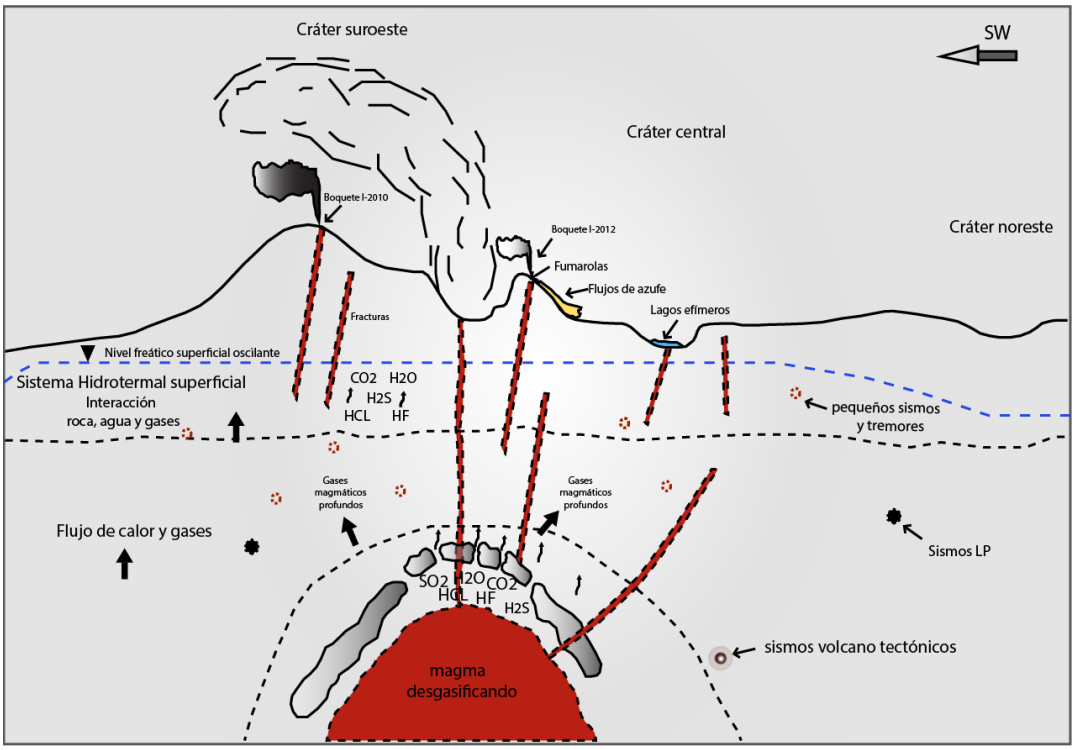


Figura 74. Sistema magmático hidrotermal, volcán Turrialba. Fuente: González *et al.*, 2015.

Flujos de azufre

Para el período de estudio no se registraron flujos de azufre dentro del área de estudio, como sí se han presentado en otras ocasiones. Un ejemplo fue el observado el 11 de enero de 2012, cerca de la fumarola Árbol Quemado y el desaparecido boquete I-2012. Este flujo tuvo una longitud medida de 175 m, y 10 cm de espesor, con una temperatura cercana a los 90 °C (González *et al*. 2015). Su origen fue un sobrecalentamiento en el sistema hidrotermal, donde el azufre se acumula, y cuando la temperatura asciende se funde.

6.2.2 Sistema hidrotermal del volcán Irazú

Durante el período de desarrollo de los balances hídricos (años 2005 y 2014), el volcán Irazú mantuvo el sistema hidrotermal concentrado principalmente en campos fumarólicos fuera de la cima, y en el flanco noroeste externo con respecto al cráter Principal, el cual fue casi nulo, o dicho de otra forma se mantuvo en relativa calma y normalidad, propio de este volcán activo, con escasa salida de gases predominando el vapor de agua.

A continuación se exponen los antecedentes y lo observado en el período del año 2014.

A principios de la década de los 90´s, la laguna del cráter Principal presentaba un pH ácido, y temperaturas ligeramente superiores a la temperatura ambiente que caracteriza un típico lago frío (Cuadro 20). Esto demuestra que al menos durante un corto período de tiempo, la influencia del sistema hidrotermal del volcán en la laguna fue considerablemente importante, este período duró tan solo cuatro años, culminando a finales de 1994, cuando se obtuvo indicios de una erupción freática generada en la pared externa noreste del cráter (RSN, 1994e). Para 1995, la temperatura de la laguna descendió hasta equilibrarse con la temperatura ambiente en la cima del macizo, es decir por debajo de 20ºC (RSN, 1995 a; 1995b). Según RSN (1997), para mediados de 1997, la desgasificación proveniente de las fumarolas localizadas en el cráter era casi nula.

Cuadro 20. Condiciones generales de la laguna durante el período 1991-1994. Las temperaturas mostradas son máximas.

	1991	1992				1993				1994			
Mes	Nov	Feb	Jun	Oct	Dic	Feb	Mar	Jun	Oct	Ene	Mar	May	Jun
pH	3,0	3,1	4,9	S.D.	S.D.	5,6	S.D.	5,5	5,8	5,5	5,5	5,5	5,5
T. Max (ºC)	26,7	28,0	28,0	25,0	23,6	24,5	24,0	32,9	24,6	25,3	20,8	21,4	22,1

*S.D.: Sin datos disponibles, fuente: RSN (1991; 1992 a; 1992 b; 1992 c; 1992d; 1993 a; 1993 b; 1993 c; 1993; 1994 a; 1994 b; 1993 c; 1993d.

Anterior al período de estudio, existía en la pared interna sur del cráter Principal, un manantial alimentado con aguas meteóricas, que daba origen a una quebrada intermitente, la cual descargaba sus aguas en el cráter Principal, sin embargo, durante el período de estudio, esta se encontraba seca. Este hecho, coincide con un descenso importante en las precipitaciones, que posiblemente ocasionó la caída del nivel freático, al disminuir la recarga.

Campos fumarólicos

Los campos fumarólicos de baja temperatura del volcán Irazú, se encuentran fuera del área de estudio, en la ladera norte externa del cráter Principal, sin embargo pese a que corresponden con aberturas que forman parte del sistema hidrotermal, la cantidad de vapor de agua que liberan es insignificante y en ocasiones, imperceptible.

Estos campos se han caracterizado por mantener una actividad fumarólica constante en el volcán Irazú (Galindo *et al*., 2004), y han presentado temperaturas promedio de 90°C, además han desaparecido las fuentes termales conocidas como Fontana, esto se asocia directamente con la disminución del nivel freático a nivel local, y coincide con la merma de lluvias en la zona (Rouwet, 2016, Com. Pers.).

Durante el período de análisis correspondiente al año 2014, no existió una variación significativa tal y como se observa en la figura 75, donde se presenta la recopilación de temperaturas de algunos meses registrados en los años 2013 y 2014, con el fin de evidenciar la escasa variación que han presentado las mismas.

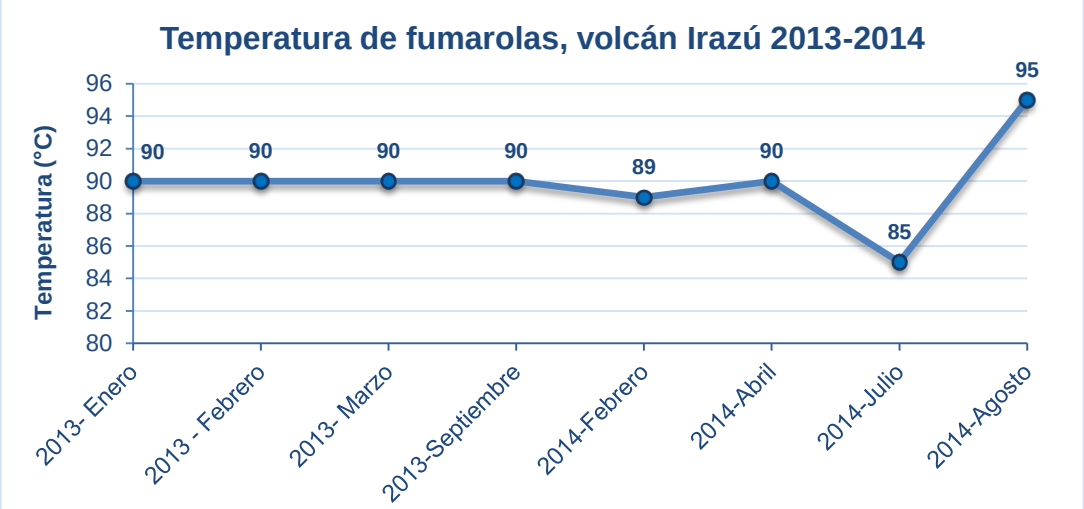


Figura 75. Variación de temperatura en las fumarolas del volcán Irazú. Fuente: Datos de Campo.

6.3 Discusión de resultados

Se determinó que el área abarcada por la superficie de la laguna formada en el cráter Principal del volcán Irazú, ha sido distinta para diferentes momentos dentro del período de estudio, y como era de esperar, se obtuvo que esta superficie ha venido variando desde 2005, con una tendencia clara a la disminución, como se muestra en la figura 76.

Se realizó una comparación entre las precipitaciones, los períodos en los que estuvo presente el lago del cráter Principal y las erupciones ocurridas en el volcán Turrialba durante el período de estudio, estos datos se muestran en el cuadro 21. Nótese que, desde 2005 ha habido tanto una disminución en las precipitaciones, como en el volumen de la laguna.

Cuadro 21. Análisis de formación de lago en el volcán Irazú, las precipitaciones y las erupciones presentadas en el volcán Turrialba.

Precipitaciones (mm)														Variaciones en la laguna	
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Meses	Área (m^2)
2005	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,9	Octubre	59733
2006	242,5	89,1	82,5	35,4	188,7	210,7	226,4	100,1	156,5	140,5	301,5	255,4	2029,3	Sin Dato	Sin Dato
2007	1,5	0,3	24,2	1,4	4,3	37	2,3	191,95	115,2	225,1	368,9	205,7	1177,9	Enero	72282
														Agosto	91308
2008	47,7	21,4	17,7	63,1	294,6	120,4	268	283,8	264,9	402,2	635,6	235,6	2655	Septiembre	12957
2009	81,2	189,6	36,2	76,7	43,7	200,8	203,6	143	78,2	185,8	263	48	1549,8	Mayo	29415
														Diciembre	17587
2010 *	8,1	166,7	92,7	90,3	125,4	293,6	185	316,3	392,4	206,7	337,8	277,7	2492,7	Abril	0
2011	150,3	50,2	28,1	38,8	199,1	138,1	227,2	125,9	150,4	548,1	337,8	298,4	2292,4	Marzo	21317
														Septiembre	8980
2012*	91,8	25,3	78,4	107,6	141,9	109,6	189,3	131,05	111,6	199,7	470	131,5	1787,8	Sin Dato	Sin Dato
2013*	9,8	6,3	56,3	64,2	187,3	138,5	109,8	136,2	237,6	147,4	142,8	52,5	1288,7	Enero	0
2014*	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,7	Todos	0

** Año con erupciones en el volcán Turrialba.*

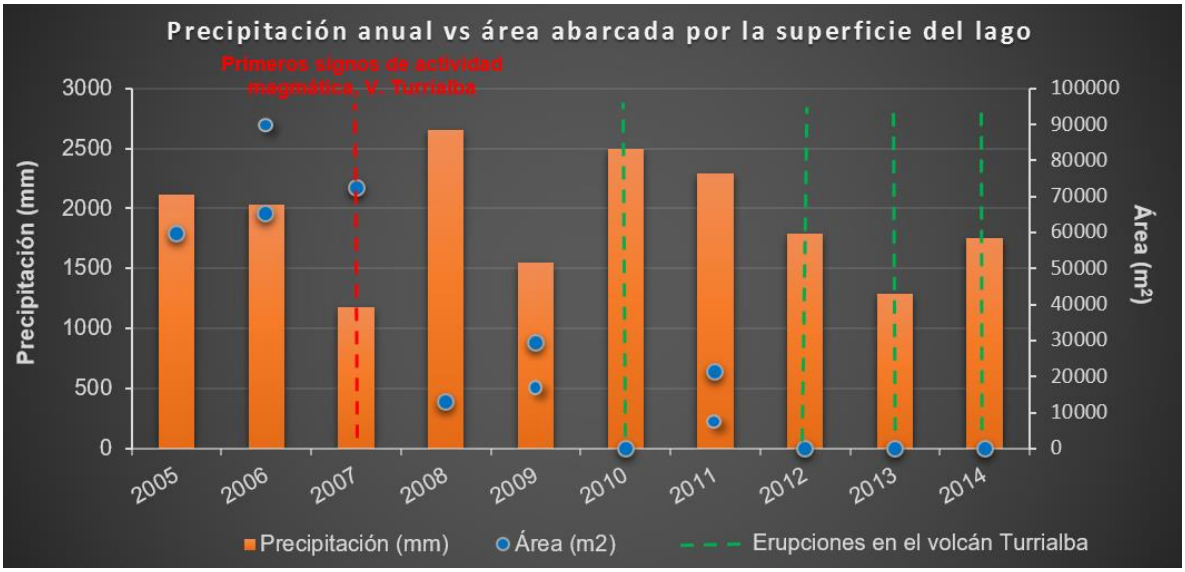


Figura 76. Comparación de las precipitaciones y el área abarcada por la laguna.

En el gráfico de la figura 76 se aprecia, como se da una especie de efecto retardado, cuando al haber un año con poca precipitación, el descenso en el nivel de la laguna se ve reflejado hasta el año siguiente (por ejemplo, la precipitación disminuyó en 2007, 2009 y 2011 con respecto al año anterior, y para los años 2008, 2010 y 2012, de dio el descenso en el nivel del lago).

Ahora bien, si se presta atención a la figura 76, donde se comparan, precipitaciones, la superficie de la laguna y los momentos en los que el volcán Turrialba ha tenido mayor actividad eruptiva, destaca el hecho, de que durante aquellos años en los que el volcán Turrialba ha tenido actividad eruptiva, la laguna del cráter Principal se encontraba completamente seca.

A inicios de 2010, se dan las primeras erupciones freáticas en el volcán Turrialba, y para el mes de abril, la laguna del volcán Irazú ya se había secado, esto coincidió además con un descenso en la cantidad de lluvia durante 2009 e inicios de 2010 González *et al*. (2015)

Durante 2011 no hay erupciones registradas del Turrialba y reaparece laguna en el Irazú, sin embargo los últimos meses del 2010 la precipitación fue elevada.

Exisitieron registros de erupciones freáticas en el volcán Turrialba para enero de 2012 (González *et al*., 2015), y el lago se mantuvo durante todo el año, hasta secarse a inicios del 2013, sin embargo, su nivel venía descendiendo desde 2012. La laguna desaparece en enero de 2013, y se reporta una erupción freática en mayo de este mismo año (González *et al*.2013).

Considerando el entorno geográfico en términos algo más amplios, se puede pensar incluso en el fenómeno ENOS (El Niño Oscilación del Sur), que ha afectado a la Región Centroamericana durante los últimos años, como la causa de la disminución en las precipitaciones, lo cual ha llevado a un claro descenso en los niveles freáticos de los acuíferos libres y colgados que son alimentados directamente por aguas meteóricas.

Si se toma en cuenta, que la formación de la laguna en el pasado se debió a la presencia de uno de estos niveles de agua subterránea, que ha descendido a raíz de la mengua en las precipitaciones, las cuales en 2014 disminuyeron un 20% con respecto al 2005, sería de esperarse, que si se diera un aumento en la cantidad de lluvia, la laguna se forme nuevamente. Sin embargo, esto no se vio reflejado en 2008, cuando se presentó un aumento considerable en la cantidad de precipitación

anual con respecto a los tres años anteriores, pero, al contrario el nivel de la laguna descendió considerablemente.

Un detalle a destacar, es el hecho de que la precipitación fue más alta durante 2012 (cuando la laguna se secó completamente), que en 2007 (momento en el que había un lago con un nivel considerable). Esto podría deberse a que la condición de precipitación durante 2012 había venido arrastrándose, mientras que la disminución de 2007 fue aislada con respecto a los períodos que lo precedieron (Figura 76).

Dentro del área uno del cráter suroeste del volcán Turrialba, no se obtuvo un valor de recarga final para los períodos de balances realizados en 2011 y 2014, ya que la diferencia entre la recarga potencial y la salida de vapor de agua dio un resultado negativo habiendo un faltante, lo cual refleja el aporte del sistema magmático e hidrotermal más profundo. Los cálculos se presentan en el cuadro 22. En el cuadro 23 se resumen las principales características de ambos volcanes.

Cuadro 22. Diferencia entre la recarga potencial y la salida de vapor de agua, obteniendo un valor negativo, para los años 2011 y 2014 en la cima del volcán Turrialba, estimados para el área del cráter activo.

RECARGA POTENCIAL ANUAL, CUENCA SUROESTE VOLCÁN TURRIALBA					
Año	**Recarga potencial (m)**	**Área (m^2)**	**Volumen (m^3/año)**	**Desgasificación (t/año)**	**Volumen final (m^3/año)**
2011	2,11	75223,58	159096,37	4188375	-4029278,63
2014	0,86	75223,58	6468,32	3102500	-3037816,75

Cuadro 23. Comparación entre las principales características de los volcanes Irazú y Turrialba con base en los resultados obtenidos.

Comparación entre los volcanes Turrialba e Irazú			
CARACTERÍSTICA O FACTOR PREDOMINANTE		**Volcanes**	
		VOLCÁN TURRIALBA	**VOLCÁN IRAZÚ**
Composición	**Rocas**	**Andesitas y basaltos**	**Andesitas, andesitas basálticas y basaltos.**
Geología superficial	**Unidad**	**Depósitos piroclásticos de caída**	**Depósitos piroclásticos de caída**
Vegetación	**Desarrollo**	Mayor grado de alteración y menor desarrollo.	Menor grado de alteración, más desarrollo.
	Tipo	Páramo	Páramo
Materiales	**Diámetro promedio**	Arena media.	Arena media.
	Clasificación suelos	SP, SW-SM o SW-SP, SM y GP.	SP, SW-SM o SW-SP, SM y SC.
	Gradación promedio	Mala	Buena
	Plasticidad	Baja	Baja
	Permeabilidad	Buena	Buena
Clima	**Precipitación**	Mayor cantidad por unidad de área (2102,45 mm año 2014).	Menor cantidad por unidad de área (1754,7 mm año 2014).
Sistema Hidrotermal	**Grado de actividad**	Aumento importante en la actividad desde 2001	No ha aumentado su actividad desde la última erupción
	Distribución	Se encuentra más restringido a la cumbre	En la cumbre y áreas aledañas en mayor medida.
Campos fumarólicos	**Rango Temperaturas**	80 a 90°C (periodo 1986 -2000) y 80 a 800°C (2001 al 2014)	80 a 90 °C
	Desgasificación	Constante y más intensa (CO_2, H_2, H_2S, SO_2, H_2O, HCl y HF)	Constante y de menor intensidad.
Laguna	Permanencia	Efimera, permanencia pocos meses.	Efimera, con permanencia de meses a años.
	Temperatura y pH	15°C, pH 2	17 y 90°C, pH 5,5 (1993)
Actividad volcánica	**Erupciones históricas**	Freáticas, Estrombolianas y Vulcanianas.	Estrombolianas, freáticas.
	Periodos eruptivos	1864-1866, 2010 -actualidad	1963 -1965

7. CONCLUSIONES, LIMITANTES Y RECOMENDACIONES

La formación de la laguna en el cráter Principal del volcán Irazú tiene una estrecha relación con la precipitación, lo cual se vio reflejado en los resultados de los balances hídricos aplicados para dos períodos diferentes, con y sin presencia de laguna en el cráter Principal, correspondiente respectivamente a los años 2005 y 2014, donde la precipitación total anual disminuyó en un 17,1% en el año 2014 con respecto al 2005, lo cual significó una reducción de 363,2 litros de agua por metro cuadrado.

En el cráter Principal del volcán Irazú, a pesar de contar con condiciones de concavidad y un fondo del cráter bastante impermeable, el descenso en las lluvias sostenido durante varios años, generó que el nivel freático descendiera y la laguna no se formara.

La formación de lagunas efímeras en el cráter Diego de la Haya y Playa Hermosa del volcán Irazú, podrían asociarse en mayor medida a un aporte del nivel freático aflorando en superficie el cual se abastece del agua de lluvia que ingresa en la zona, por lo cual el descenso o aumento en las mismas y la presencia de barreras geológicas que logren detener el flujo vertical del agua, son aspectos relacionados a la formación de estas lagunas.

En el período analizado para el volcán Turrialba, no se dio una recarga acuífera en la cuenca del cráter activo, ya que la cantidad de agua que sale como vapor de agua, superó con creces la precipitación total que cayó en la cuenca durante los dos períodos en que se realizó el balance. Por lo tanto se considera que el agua se evapora constantemente durante la actividad fumarólica, proviene del sistema hidrotermal más profundo combinado con el sistema magmático.

Es de suponer también, que el agua que ingresa a los cráteres central y noreste del volcán Turrialba, entran en contacto con el calor imperante en el sistema hidrotermal magmático del cráter activo, evaporándose casi por completo, sin oportunidad de alcanzar un nivel saturado.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES LIMITANTES Y RECOMENDACIONES

Geológicamente, la cima del volcán Turrialba se caracteriza por presentar, coladas de lava andesíticas cubiertas por algunos depósitos de flujos y oleadas piroclásticas, depósitos lacustrinos, y depósitos piroclásticos de caída más recientes.

En cuanto a las propiedades físicas texturales de los materiales que cubren las cimas de los volcanes Turrialba e Irazú, se puede denotar su baja a nula plasticidad, debida principalmente, al predominio de los limos y arenas, sobre las arcillas. Granulométricamente, los materiales se comportan como arenas con buena permeabilidad, con valores de infiltración entre 3,87 cm/hora a 264 cm/hora.

Asimismo, los valores de densidad obtenidos fueron relativamente bajos, considerando que se trata de materiales andesíticos y basálticos. Esto indica que existe una micro-porosidad, que se explica en el hecho de que estos materiales se tratan en su mayoría de depositos piroclásticos que sufrieron fragmentación durante su depositación, que ha sido producto de erupciones volcánicas recientes. Esta característica es apreciable tanto a escala micro, como macro, pues en muchos casos, los materiales que cubren las cimas de los volcanes, presentaron texturas escoriáceas, que les confieren una alta porosidad y baja densidad aparente.

Todas estas características, ponen en evidencia la buena porosidad, que presentan los materiales en general, que a su vez permiten la rápida infiltración del agua que precipita. Es debido a esto, que en el volcán Irazú, en condiciones de precipitaciones sostenidas por varios años, se da una recarga hacia el acuífero más superficial, promoviendo la formación de una laguna en el cráter Principal. Caso contrario, es lo que sucede en el volcán Turrialba, donde a causa del intenso calor proveniente del sistema magmático, el agua que precipita, si bien infiltra, se evapora rápidamente, evitando así que se dé la formación de lagunas permanentes, incluso en las épocas en que se presentan altas precipitaciones.

Los balances hídricos realizados permitieron ampliar el conocimiento sobre el comportamiento hídrico superficial de ambos volcanes, lo cual a su vez se

relaciona directamente con la actividad hidrotermal superficial, donde el agua recircula en el sistema, principalmente en medios acuíferos, lagunas y campos fumarólicos.

Se observaron dos escenarios volcánicos diferentes, en los cuales, el volcán Irazú se mantuvo sin actividad eruptiva durante el período de estudio, con un sistema hidrotermal concentrado en campos fumarólicos de baja temperatura en la pared externa norte del cráter Principal, donde la evaporación fue mínima. Mientras que en el caso del volcán Turrialba, se presentó una intensa desgasificación, proveniente de campos fumarólicos de alta temperatura, con componentes gaseosos indicadores de una inminente actividad eruptiva magmática, la cual se inició a finales de octubre de 2014.

Cuando el volcán Turrialba inició su actividad eruptiva, influenciada directamente por un sistema magmático, la alta temperatura y la fuerte desgasificación impidieron la formación de lagunas permanentes dentro de los cráteres. Sin embargo, se formaron lagunas calientes efímeras color turquesa, debido a la impermeabilización de la superficie por la caída de ceniza recién eruptada, ya que estas zonas no estaban en contacto directo con campos fumarólicos de alta temperatura.

Los volcanes Turrialba e Irazú, presentaron similitudes en lo respectivo a los diversos parámetros que influyeron en la determinación del balance hídrico superficial, principalmente en cuanto a: comportamientos granulométricos, donde se observó una tendencia en la curva granulométrica hacia el material grueso (arenas), además presentaron una buena permeabilidad y baja plasticidad.

En el modelo propuesto, sin presencia de erupciones en ambos volcanes, se estableció la existencia de un acuífero superficial esto basándose en la temperatura de desgasificación de los campos fumarólicos, los cuales coinciden en su mayoría con la temperatura de ebullición del agua a las altitudes de ambas cimas de los volcanes Turrialba e Irazú.

En el período de desarrollo del balance hídrico realizado en el volcán Turrialba, se asumió que este acuífero superficial se secó total o parcialmente, debido a las fuertes temperaturas propias de la fase eruptiva en la que permaneció, con un sistema magmático hidrotermal imperante.

Debido a que no se realizó geofísica en el área de estudio y a que no se cuenta con datos de perforación, no se puede establecer el tipo y las características del acuífero más superficial existente en ambas cimas de volcanes activos, sin embargo se estableció en el modelo propuesto la presencia del mismo, basándonos principalmente en los datos registrados de los valores de temperatura de desgasificación en los campos fumarólicos de ambos volcanes, mencionados y cercanos a los 90°C, lo cual ya ha sido analizado, por ejemplo en (Vaselli *et al.,* 2010), los cuales mencionan que la temperatura de salida de la mayoría de las fumarolas a la temperatura de ebullición del agua pura a las altitudes de 3.000 m (aproximadamente 90 °C), puede sugerir la presencia de un acuífero superficial, además por la presencia de diversos manantiales (comunicación verbal Dmitri Rouwet).

En cualquier método numérico van a existir fuentes de error, tal y como ocurrió en el de Schosinsky (2006); donde al introducir la variable, por ejemplo capacidad de campo, en algunos casos se tuvo que cambiar el valor del decimal para poder obtener valores, lo cual puede incidir en el resultado final de cada balance, sin embargo tal y como vemos los resultados, las áreas definidas para cada volcán, presentaron valores de recarga con ligeras variaciones entre sí, debido a la similitud en los parámetros valorados y obtenidos.

Limitantes y Recomendaciones

Debido al considerable incremento en la magnitud y la frecuencia de las erupciones del volcán Turrialba, posterior al 30 de octubre del 2014, y por razones de seguridad, se decidió no ingresar al área de los cráteres a realizar las pruebas de infiltración, ni recolectar muestras para los ensayos de capacidad de campo y

punto de marchitez. No obstante, para esa fecha ya se había finalizado la recolección de muestras en la cima de este volcán, con excepción del fondo del cráter activo, donde debido a la presencia de amplias zonas fumarólicas y a la fuerte desgasificación, no se logró descender por razones de seguridad.

En la pared interna sur del cráter Principal del volcán Irazú, se observó una naciente de carácter intermitente, la cual ocasionalmente descargaba sus aguas hacia el mismo cráter. Sin embargo durante el período de desarrollo del balance, se procedió a la medición o estimación de su caudal en tres diversas ocasiones, pero la misma se encontraba seca.

En el balance hídrico desarrollado en el volcán Turrialba, se asumieron las condiciones geológicas superficiales previas al período eruptivo de octubre de 2014. Y se asignaron valores de infiltración, capacidad de campo y punto de marchitez, de los resultados obtenidos en los materiales del Irazú, que después de ser analizados, evidenciaron similitudes a los del volcán Turrialba.

Las condiciones de la cima del volcán Turrialba, cambiaron completamente desde la erupción ocurrida el día 30 de octubre del año 2014. Las capas de ceniza fina, impermeabilizaron la superficie del terreno la cumbre y con esto, se dio un cambio en las características superficiales existentes cuando se recolectaron las muestras de suelo, por lo cual se trabajó manteniendo las condiciones originales de los materiales superficiales y su relación con el balance hídrico.

Se recomienda instalar más estaciones meteorológicas en las cimas de los volcanes activos, que permitan monitorear de una forma más completa, las variaciones de los elementos climáticos en cada zona, ya que en nuestro país se dan pequeños microclimas con variaciones en una corta distancia, tal y como ocurre en el caso del volcán Poás, y estos sitios son puntos estratégicos para la infraestructura de telecomunicaciones.

Otra recomendación, es promover proyectos y/o futuras de investigaciones donde se realicen sondeos geofísicos, por ejemplo el método de GEORADAR

aplicado en las cimas de volcanes activos para diversos períodos, con el fin de mejorar el modelo conceptual geológico e hidrogeológico en estos sitios, que definan la estratigrafía en profundidad y las variaciones del nivel freático.

El análisis geoquímico de los fluidos volcánicos, realizado con cierta periodicidad y sistemáticamente, en momentos que se evidencien cambios importantes, podría ayudar a comprender la evolución de un sistema volcánico particular.

Una de las limitantes del método de Schosinsky (2006), es que no contempla dentro de los cálculos factores geológicos que podrían incidir de forma importante en la cantidad de agua que se recargue en un acuífero, algunos de estos factores son las fallas y fracturas, planos de estratificación, y tipos de roca.

Dentro de las limitantes al aplicar el método de Schosinsky (2006); es que la vegetación juega un papel importante en el método, sin embargo la zona de estudio contemplaba sectores con vegetación páramo más densa y mejor desarrollada, sin embargo en otras zonas esta era más escasa, presentándose como un tipo de zacate corto, sin embargo se asignaron valores donde se asemejaba más a los valores teóricos propuestos de coeficiente de vegetación.

El trabajo propuesto se desarrolló en una cuenca cerrada debido a la complejidad y características de la zona de estudio sin embargo el área podría extenderse en futuras investigaciones, incluyéndose laderas externas y las bases de cada macizo volcánico, donde se recomendaría incluir análisis geoquímicos y geofísicos.

El método de Schosinsky (2006), presenta diversas limitantes, algunas de las cuales ya se mencionaron anteriormente, sin embargo es el método más ampliamente utilizado o aplicado y conocido en la actualidad, y además se encuentra aprobado por el Reglamento de Metodologías Hidrogeológicas para la evaluación del Recurso Hídrico (2012), por lo cual se decidió aplicar el mismo e incluirle parte de la desgasificación que ocurre en el sistema del volcán Turrialba.

8. REFERENCIAS

ADAMS, E., COSLER, D., J. & HELFRICH, K., 1990: Evaporation from heated water bodies: Predicting combined forced plus free convection.-Water. Resour. Res. 26:425-435.

ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C. & GONZÁLEZ-ILAMA, G., 2013a: Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica. (Enero y Febrero) -16 págs. RSN UCR-ICE.

ALPÍZAR, Y., GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R. & RAMÍREZ, C., 2013 b: Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica. (Marzo) -13 págs. RSN UCR-ICE

ALPÍZAR, Y., GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C. & MORA, M., 2013 c: Informe sobre la actividad de los volcanes activos De Costa Rica. (Abril) -13 págs. RSN UCR-ICE.

ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., MORA, M., RAMÍREZ, C., GONZÁLEZ-ILAMA, G. & TAYLOR, W., 2013 d: Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica. (octubre). -21 págs. RSN UCR-ICE.

ALPÍZAR, Y., GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA, M., MORA-AMADOR, R., & RAMÍREZ, C., 2014 a : Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica. (octubre) -14 págs. RSN UCR-ICE.

ALPÍZAR, Y., GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R., MORA, M., & RAMÍREZ, C. &TAYLOR, W, 2014b: Informe sobre la actividad de los volcanes activos de Costa Rica. (Noviembre) -12 págs. RSN UCR-ICE

ALPÍZAR, Y, MORA-AMADOR, R, GONZÁLEZ, G, RAMÍREZ, C J., MORA, M M., & TAYLOR, W., 2014c: Actividad de los Volcanes de Costa Rica Durante el Periodo 2012-2013. *Revista Geológica de América Central*, (51), 145-158. Revisado el 11 de junio de 2016: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242014000200008&lng=en&tlng=es.

ALVARADO, G., 1984: Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica.-vii + 183 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

ALVARADO, GE, 1993: Vulcanología y Petrología del Volcán Irazú, Costa Rica.-261 págs. Univ. Kiel, tesis Ph.D.

ALVARADO, G.E., 2009: Los volcanes de Costa Rica: Geología, historia, riqueza natural y su gente (3a edición).- 386 págs. Ed. UNED, San José.

ALVARADO, G.E., CARR, M.J., TURRIN, B.D., SWISHER, C., SCHIMINCKE, H.-U. & HUDNUT, K.W., 2006: Recent volcanic history of Irazú volcano, Costa Rica: Alternation and mixing of two magma batches, implying at least tow intracrustal chambers.- En: W.I. ROSE, W.I.,BLUTH, G.J.S., CARR, M.J., EWERT, J., PATINO, L.C. & VALLANCE, J. (eds): Natural Hazards in Central America. Geol. Soc. Am. Spc. Paper, 412: 259-276, DOI: 10.1130/2006.2412(14).

ALVARADO, G.E., MORA, M. & ULLOA, A., 2013: la caída de “ceniza” proveniente del volcan Irazú (Costa Rica) el 8 de diciembre de 1994: ¿una explosión freática?.- Rev. Geol. Amér. Central 48: 159-168, 2013, ISSN: 0256-7024

ALVARADO, G. E.; SCHMINCKE, H, 2013: The 1723 A.D. violent strombolian and phreatomagmatic eruption at Irazú Volcano, Costa Rica.-Rev. Geol. América Central 30: 189-197.

BROWNE P.R.L. & LAWLESS J.V., 2001: Characteristics of hydrothermal eruptions, with 670 examples from New Zealand and elsewhere. Earth Sci. Rev. 52:299-331.

CALVO, J. B., 1887: Apuntamientos geográficos, estadísticos e históricos. Imprenta Nacional.

CALVO, J., 1999: Principios de hidrología forestal tropical.- 136 págs. Inst. Tecnol. Costa Rica, Esc. Ing. Forestal, Cartago, Costa Rica.

CARR, M.J., 1984: Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the Central American volcanic front. – J.Volcanol. Geoyherm. Res. 20: 231-252.

CARR, M. J., FEIGENSON, M. D., PATINO, L. C. AND WALKER, J. A., 2003: Volcanism and geochemistry in Central America: Progress and problems. Inside the Subduction Factory (Eiler, J., ed.), 153–174, American Geophysical Union.

CARRIER III, W.D., ASCE, F., 2003: Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman.- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 129:11 (1054)

CONDE, V., BREDEMEYER, S., DUARTE, E., PACHEVO, J. F., MIRANDA, S., GALLE, B., AND HANSTEEN, T. H., 2014: SO2 degassing from Turrialba Volcano linked to seismic signatures during the period 2008– 2012, Int. J. Earth Sci., 103, 1983–1998, doi:10.1007/s00531-013-0958-5.

CRUZ, T., HEREDIA J. & M. C. CABRERA M. C., 2008: Modelo de flujo en un acuífero volcánico: el Acuífero de la Aldea... Boletín Geológico y Minero, 119 (1): 107-118

DAVIES, D., QUEARRY, W., BONIS, S. B., 1978: Glowing avalanches from the 1974 eruption of the volcano Fuego, Guatemala. - Geological Society of America Bulletin, March, 1978. 89, 369-384.

DE LA HAYA, D., 1852: La actividad del volcán Irazú en 1723. La Gaceta, 175-177, San José.

FERNANDEZ, E., DUARTE, E., SÁENZ, W., MARINO, T, MARTÍNEZ, M., BRENES, J., OVSICORI-UNA, 2010 a: Estado de los Volcanes Enero del 2010.

FERNANDEZ, E., MARTÍNEZ, M., SÁENZ, W., VILLEGAS, M. & DUARTE, E., 2010 b: Estado de los Volcanes Abril del 2010.-

FERNANDEZ, E., MARTÍNEZ, M., SÁENZ, W., DUARTE, E., BRENES, J., VILLALOBOS, A., OVSICORI-UNA, 2010 c: Estado de los Volcanes Agosto del 2010.

FERNANDEZ, E., DUARTE, E., SAENZ, W., OVSICORI-UNA, 2011a: Estado de los Volcanes Febrero del 2011.

FERNANDEZ, E., DUARTE, E., SAENZ, W., MARTÍNEZ, M., OVSICORI-UNA, 2011b: Estado de los Volcanes Junio del 2011.

FERNANDEZ, E., MARTINEZ, M., SÁENZ, W., DUARTE, E., VILLALOBOS, A., VAN DER LAAT, R., MENJIVAR, E., OVSICORI-UNA, 2011c: Estado de los Volcanes Julio del 2011.

FERNANDEZ, E., SÁENZ, W., AVARD, G., BARQUERO, J., MARTINEZ, M., DUARTE, E., VAN DER LAAT, R., MENJIVAR, E., OVSICORI-UNA, 2011d: Estado de los Volcanes Agosto 2011.

FERNANDEZ, E., MARTINEZ, M., AVARD, G., DUARTE, E., SÁENZ, W., VILLALOBOS, A., OVSICORI-UNA, 2011e: Estado de los Volcanes Noviembre del 2011.

GALINDO, I., MELIÁN, G. V., SALAZAR, J., HERNÁNDEZ, P., PÉREZ, N. M., RAMÍREZ, C. J., FERNÁNDEZ, M., ALVARADO, G. E., SUMINO, H., & NOTSU, K., 2004: Emisión difusa de dióxido de carbono en el volcán Irazú, Costa Rica. –Rev. Geol. Amér. Central, 30: 157–165.

GONZÁLEZ, C., 1910: Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica 1608-1910 (edición original: 1910, San José: Tipogr. de Avelino Alsina, MCMX, iv + 200 pp) Cartago: Ed. Tecnológica de Costa Rica, x + 256.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., RAMÍREZ, C., MORA-AMADOR, R., & ALPÍZAR, Y., 2013a: Hydrogeochemical analysis of Laguna Botos water and its importance in the water use of the facilities of the Parque Nacional Volcán Poás, Costa Rica.-IAVCEI Commission of Volcanic Lakes, 8th Workshop on Volcanic Lakes 8, 45.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R., MORA, M., RAMÍREZ, C., TAYLOR, W. & ALPÍZAR, Y., 2013 b: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Mayo) -16 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R., MORA, M., TAYLOR, W., RAMÍREZ, C. & ALPÍZAR, Y., 2013 c: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Junio) -15 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA, M., ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., TAYLOR, W. & RAMÍREZ, C., 2013 d: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Julio) -12 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., MORA, M., MORA-AMADOR, R., & RAMÍREZ, C., 2013 e: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Septiembre) -15 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C. & MORA, M. &TAYLOR, W, 2013 f: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Noviembre) -19 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., RAMÍREZ, C. & MORA-AMADOR, R., 2013 g: Reporte de la erupción freática ocurrida en el Domo del volcán Poás, 8 de mayo de 2013-7 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C., ALPÍZAR, Y., MORA, M. &TAYLOR, W, 2014 a: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Enero) -10 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., RAMÍREZ, C., MORA, M., MORA-AMADOR, R. &TAYLOR, W, 2014 b: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Febrero) -15 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C., MORA, M. &TAYLOR, W, 2014 c: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Marzo) -12 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C. & MORA, M. 2014 d: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Abril) -14 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C. & MORA, M. &TAYLOR, W, 2014 e: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Junio) -12 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R., MORA, M., ALPÍZAR, Y. & RAMÍREZ, C., 2014 f: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Julio) -7 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., MORA-AMADOR, R., ALPÍZAR, Y., MORA, M. & RAMÍREZ, C., 2014 g: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Agosto) -11 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., RAMÍREZ, C., MORA-AMADOR, R., & ALPÍZAR, Y., 2014 h: Informe de campo: Actividad eruptiva del volcán Turrialba del 28 de octubre al 3 de noviembre del 2014 (Noviembre) -18 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C. & SANTAMARÍA, R, 2014 i: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (Diciembre) -12 págs. RSN UCR-ICE.

GONZÁLEZ, G., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C., ROUWET, D., ALPIZAR, Y., PICADO, C. & MORA, R. 2015: Actividad histórica y evaluación de la amenaza del volcán Turrialba, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central 52: 129-149, 2015 DOI: 10.15517/rgac.v0i52.19033 ISSN: 0256-7024.

GUZMÁN S. R., PETRINOVIC, I. A., BROD, J.A., 2006: Pleistocene mafic volcanoes in the Puna-cordillera Oriental boundary, NW-Argentina.- Journal of Volcanology and Geothermal Research 158 (1–2): 51-69.

HILTON, D., RAMÍREZ, C., MORA-AMADOR, R., FISHER, T., FÜRI, E., BARRY, P. & SHAW, A., 2010: Monitoring of temporal and spatial variations in fumarole

helium and carbon dioxide characteristics at Poás and Turrialba volcanoes, Costa Rica (2001-2009).- Geoch. Jour. 44: 431-440.

HOFFMANN. C., 1856: Viajes por Costa Rica.- En: Zeledón, E. (comp.) 1997: Viajes por la República de Costa Rica II.- Ed. Museo Nacional, San José: 163-207.

HURWITZ, S., LOWENSTERN, J.B. & HEASLER, H., 2007. Spatial and temporal geochemical trends in the hydrothermal system of Yellowstone National Park: Inferences from river solute fluxes. Journal of Volcanology and Geothermal Research 162, 149-171.

HUDNUT, K., 1983: Geophysical Survey of Irazú Volcano. Ba-Thesis, Darmouth College.- 82 pág.

INGEBRITSEN, S.E., GALLOWAY, D.L., COLVARD, E.M., SOREY, M.L., MARINER, R.H., 2001. Time-variation of hydrothermal discharge at selected sites in the western United States: implications for monitoring. J. Volcanol. Geotherm. Res. 111, 1–23.

INGEBRITSEN, S.E., GALLOWAY, D.L., COLVARD, E.M., SOREY, M.L., MARINER, R.H., 2001. Time-variation of hydrothermal discharge at selected sites in the western United States: implications for monitoring. J. Volcanol. Geotherm. Res. 111, 1–23.

KAPPELLE, M., 2005: Los suelos de los Páramos de Costa Rica.- Páramos de Costa Rica. M. Kappelle y S. P. Horn eds. ISBN 9968-927-09-0

KOLARSKY, R., MANN, P. & MONTERO, W., 1995: Forearc deformation related to the subduction of the Cocos ridge, southeastern Costa Rica. – En: MANN. P. (ed-.): Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America. – Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 295: 235-262.

KRUSE, S; MORA-AMADOR, R; RAMÍREZ, C; ALVARADO, G., 2010: Imágenes con el radar de Penetración terrestre en la tefroestratigrafía reciente de los Volcanes Poás e Irazú, Costa Rica.- Rev. Geol. América Central 43: 119-135.

KRUSHENSKY, R., 1972: Geology of the Istarú Quadrangle, Costa Rica.-Geological Survey Bulletin 1358.-46 pág.

KUSSMAUL, S., TOURNON, J. & ALVARADO, G., 1994: Evolution of the Neogene to Quaternary igneous rocks of Costa Rica. – Profil, 7: 97-123.

LA GACETA, 12 de marzo 1864a, #258: Ascensión al volcán Turrialba, en Costa Rica.

LA GACETA, 2 de octubre 1864b, #286: Nota sobre la lluvia de ceniza.

LA GACETA, 9 de octubre 1864c, #287: El volcán de Turrialba y sus cenizas.

LEE, T. & SWANCAR, A., 1997: Influence of evaporation, ground water, and uncertainty in the hydrologic budget of lake Lucerne, a seepage lake in Polk County, Florida. USGS Water-Supply Painvepers 2439: 61 págs.

LINKIMER, L., 2003: Neotectónica del extremo oriental del cinturón deformado del centro de Costa Rica.-103 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

LUTEYN, J. 2005: Introducción al ecosistema Páramo. In: Páramos de Costa Rica. Eds. M, Kappelle; S, Horn. 1ed. Heredia. CR. Editorial INBio. 767p.

MARTINI, F., TASSI, F., VASELLI, O., DEL POTRO, R., MARTINEZ, M., DEL LAAT, R. V., AND FERNANDEZ, E. 2010: Geophysical, geochemical and geodetical signals of reawakening at Turrialba volcano (Costa Rica) after almost 150 years of quiescence, J. Volcanol Geoth. Res., 198, 416-432.

MARSHALL, J., 2000: Active tectonics and Quaternary landscape evolution across the western Panama block, Costa Rica, Central America. – 304 págs. Univ. Pennsylvania, Estados Unidos (Ph.D).

MARSHALL, J., FISCHER, D., & GARDNER, T.W., 2000: Central Costa Rica deformed belt: Kinematics of diffuse faulting across the western Panama block. – Tectonics, 19: 468-492.

MARR, W., 1853: Viaje a Centroamérica.- 472 págs. Traducido por Reinhold, I., (2004).- Ed. UCR, San José.

MARTINI, F., TASSI, F., VASELLI, O., DEL POTRO, R., MARTINEZ, M., VAN DEL LAAT, R. & FERNANDEZ, E., 2010: Geophysical, geochemical and geodetic signals of reawakening at Turrialba volcano (Costa Rica) after almost 150 years of quiescence.- J. Volc. Geoth. Res. 198: 416-432.

MINISTERIO DE AMBIENTE, ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES, 2012: Metodologías Hidrogeológicas para la evaluación del Recurso Hídrico. Acuerdo 60-2012. -16 págs. San José, Costa Rica.

MONTERO, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la Microplaca de Panamá. –Rev. Geol. Amér. Central, 24: 29–56.

MONTERO, W., 2003: El Sistema de Falla Atirro-Río Sucio y la Cuenca de Tracción de Turrialba-Irazú: Indentación Tectónica Relacionada con la Colisión del Levantamiento del Coco. –Rev. Geol. Amér. Central, 28: 05–29.

MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C., GONZÁLEZ-ILAMA, G., ALPÍZAR, Y & MORA, M. 2014: Informe Sobre La Actividad De Los Volcanes Activos De Costa Rica. (mayo) -13 págs. RSN UCR-ICE.

MORA-AMADOR, R., 2001: Informe Semestral de la actividad volcánica en la cordillera volcánica Central, Enero-Junio 2001.- 38 págs. RSN UCR-ICE (Informe interno).

MORA-AMADOR, R., 2003: Informe anual de la actividad de la cordillera volcánica Central, 2002, Costa Rica.- 50 págs. RSN UCR-ICE (Informe interno).

MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C., & FERNÁNDEZ, M., 2004: La actividad de los volcanes de la Cordillera Central, Costa Rica, entre 1998 – 2002.- Rev. Geol. América Central 30: 189-197

MORA-AMADOR, R. & ROJAS, W., 2007: Reporte de actividad sísmica y volcánica del volcán Turrialba.- 8 págs. RSN UCR-ICE (Informe interno).

MORA, M., TAYLOR, W., BAKKAR, H., OSIVAM-ICE, 2014: Boletín, Niveles de actividad sísmica de los volcanes activos de Costa Rica (enero a diciembre del 2014) – 4 págs.

MORA, O., 2010: Caracterización del ecosistema Páramo, y evaluación de variables que lo afectan en los volcanes Irazú y Turrialba. Tesis de graduación. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

MORELL, K.D., KIRBY, E., FISHER, D.M. & VAN SOEST, M., 2012: Geomorphic and exhumational response of the Central American volcanic arc to Cocos Ridge subduction: Journal of Geophysical Research, v. 117, no. B04409, doi:10.1029/2011JB008969.

MOUSSALAM, Y., PETERS, N., RAMÍREZ, C., OPPENHEIMER, C., AIUPPA, A. & GIUDICE G., 2014: Characterization of the magmatic signature in gas emissions from Turrialba volcano, Costa Rica. *Solid Earth*, 5, 1341-1350. doi: 10.5194/se-5-1341-2014.

ODONG J., 2007: Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. Journal of American Science 3(3): 54-60.

OERSTED, A. S., 1863: L' Amerique Centrale: Recherches sur sa flore et sa Géographie Physique.- Imprenta Blanco Luna, Copenhague.

ONU, 1972: Manual de instrucciones, estudios hidrológicos.- 540 págs. ONU Publ. Nº 70, San José, Costa Rica.

PACHECO, J., MARTÍNEZ, M., MULLER, C., AVARD, G., OVSICORI-UNA, 2014: Estado de los volcanes de Costa Rica, Resumen Anual 2014.

PANIAGUA, S., 2002: Síntesis de algunos volcanes activos y peligrosos de América Central: prevención, mitigación y desastres.- 296 págs. Editorial: CEPREDENAC, Panamá.

PITTIER, H., 1888: Boletín Trimestral.- 62 págs. IGN (Informe interno).

REAGAN, M.K., & GILL, J.B., 1989: Coexisting calcalkaline and high-Niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: Implications for residual titanites in arc magma sources. –J. Geophys. Res. 94: 4619-4633.

REAGAN, M., DUARTE, E., SOTO, G. & FERNÁNDEZ, E., 2006: The eruptive history of Turrialba volcano, Costa Rica and potential hazard from future eruptions.- Geol. Soc. of Amer. S.P., 412: 235-253.

RED SISMOLÓGICA DE COBERTURA NACIONAL, Escuela Centroamericana De Geología, Departamento De Geología Del Ice. 1985. Reporte de Actividad Volcánica, mayo de 1985. Reporte mensual. Disponible en: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/1985/Boletin_1985_05.pdf

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1986: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Enero-Agosto 1986).- Rev. Geol. Amér. Central, 5: 105-108.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1987: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período enero-junio de 1987).- Rev. Geol. Amér. Central, 7: 187-192.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1987b: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período julio-diciembre de 1986).- Rev. Geol. Amér. Central, 6: 121-126.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1988 a: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período de Julio a Diciembre 1987).- Rev. Geol. Amér. Central, 8: 135-139.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1988 b: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período julio-diciembre de 1988).- Rev. Geol. Amér. Central, 9: 107-112.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1989: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período de Julio a Diciembre de 1988).- Rev. Geol. Amér. Central, 10: 101-106.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1991: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período enero-diciembre de 1990).- Rev. Geol. Amér. Central, 12: 103 -108.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 1995: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período de Enero-Diciembre 1994).- Rev. Geol. Amér. Central, 18: 97-100.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL, 1998: Boletín de la Red Sismológica Nacional, noviembre 1998. Reporte mensual. Disponible en: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/1998/Boletin_1998_11.pdf

RED SISMOLÓGICA NACIONAL, 1999: Boletín de la Red Sismológica Nacional, enero 1999. Reporte mensual. Disponible en: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/1999/Boletin_1999_01.pdf

RED SISMOLÓGICA NACIONAL, 2000 a: Boletín de la Red Sismológica Nacional, enero 2000. Reporte mensual. Disponible en: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/2000/Boletin_2000_01.pdf

RED SISMOLÓGICA NACIONAL, 2000 b: Boletín de la Red Sismológica Nacional, febrero 2000. Reporte mensual. Disponible en: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/2000/Boletin_2000_02.pdf

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2001: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica (Período de Enero de 1997-Diciembre 2000).- Rev. Geol. Amér. Central, 25: 107-113.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2002 a: RESUMEN DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA Y VOLCÁNICA DE COSTA RICA DURANTE EL AÑO 2001.- Rev. Geol. Amér. Central, 26: 101-105.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2002 b: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica, Febrero del 2002. Edición Mensual, Número 2, Año 2002.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2003 a: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica, enero del 2003. Edición Mensual, Número 01, Año 2003.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2003 b: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica, marzo del 2003. Edición Mensual, Número 03, Año 2003.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2003 c: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica, julio del 2003. Edición Mensual, Número 07, Año 2003.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2004: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica, febrero del 2004. Edición Mensual, Número 02, Año 2004.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2007 a: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica, abril del 2007.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2007 b: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica durante mayo del 2007.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2007c: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica durante agosto del 2007.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2007 d: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica durante setiembre 2007.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2007 e: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica durante octubre del 2007.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2007 f: Boletín Resumen de Sismos Sentidos y Actividad Volcánica en Costa Rica durante el mes de noviembre 2007.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2008 a: Boletín Resumen de Sismos Sentidos en Costa Rica durante enero 2008.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2008 b: Boletín Resumen de Sismos Sentidos en Costa Rica durante marzo 2008.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2009 a: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica durante el año 2008.- Rev. Geol. Amér. Central, 41: 111-116.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2009 b: Boletín sismos sentidos mes de abril 2009.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2009 c: Boletín sismos sentidos mes de mayo 2009.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2009 d: Boletín sismos sentidos mes de junio 2009.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2009 e: Boletín sismos sentidos mes de diciembre 2009.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2010: Resumen de la actividad sísmica y volcánica de costa rica durante el año 2009.- Rev. Geol. Amér. Central, 42: 127-134.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2012a: Resumen de la actividad sísmica y volcánica en Costa Rica durante el año 2011.- Rev. Geol. Amér. Central, 46: 189 -198.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2012b: Reporte de sismos sentidos enero 2012.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2012c: Reporte de sismos sentidos febrero 2012.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2012d: Reporte de sismos sentidos marzo 2012.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2012e: Reporte de sismos sentidos abril 2012.

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (UCR-ICE), 2013: Informe de la actividad de los volcanes activos de Costa Rica Enero-febrero

ROJAS, W. & PERALDO, G., 2009: Informe sobre visita al volcán Turrialba.- 6 págs. RSN UCR-ICE (Informe interno).

ROUWET, D., 2011: A photographic method for detailing the morphology of the floor of a dynamic crater lake: the El Chichón case (Chiapas, Mexico). -J Limnol 12(3): 225-233.

ROUWET, D., MORA-AMADOR, R., RAMÍREZ, C. & GONZÁLEZ, G., 2010: Hydrogeochemical model of the Irazú and Turrialba “twin volcanoes” (Costa Rica).- AGU Fall Metting, San Francisco, E.E.U.U., Abstracts #V23A-2392.

ROUWET, D. & MORRISSEY, M.M (en prensa) 2014: Mechanisms of crater lake breaching eruptions. In: Volcanic Lakes, Eds Rouwet D., Christenson B., Tassi F., Vandemeulebrouck J. Springer-Heidelberg, IAVCEI Series Advances in Volcanology: (prensa).

ROUWET, D., TARAN, Y. & VARLEY, N., 2004: Dynamics and mass balance of El Chichón crater lake, Mexico.-Geofís. Int. 43: 427-434.

ROUWET, D., TARAN, Y., INGUAGGIATO, S., VARLEY, N. & SANTIAGO, S., 2008: Hydrochemical dynamics of the “lake-spring” system in the crater of El Chichón volcano (Chiapas, Mexico).- J. Volc. Geoth. Res. 178: 237-248.

RUIZ, P., TURRIN, B.D., SOTO, G.J., DEL POTRO, R., GAGNEVIN, D., GAZEL, E., MORA, M., CARR, M.J. &. SWISHER, C.C., 2010: Unveiling Turrialba (Costa Rica) volcano's latest geological evolution through new 40Ar/39Ar, ages. – Abstract V23B-2437presentado en la 2010 AGU Fall Meeting, San Francisco, California, 13-17 diciembre.

SANFORD, W., KONIKOW, L., ROWE, G. & BRANTLEY, S., 1995: Groundwater transport of crater lake brine at Poás Volcano, Costa Rica.-J. Volc. Geoth. Res. 64: 269-293.

SAPPER, K., 1942: Viajes a varias partes de la República de Costa Rica (1899-1924).-140 págs. Imprenta Universal, San José.

SECCIÓN DE SISMOLOGÍA Y VULCANOLOGÍA, 1979 a: Informe sobre la actividad sísmica correspondiente al mes de febrero de 1979. Universidad de Costa Rica. Reporte mensual. Disponible en: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/1979/Boletin_1979_02.pdf

SEEBACH, K. VON, 1865: Volcanes situados al norte de las tierras altas de Costa Rica: Turrialba, Irazú-Tenorio.-En: Karl von Seeback y sus estudios sobre Costa Rica.-Publicaciones del Liceo de Costa Rica, 9: 9-28, Imprenta Lehmann, San José (reproducción en 1922).

SECCIÓN DE SISMOLOGÍA Y VULCANOLOGÍA, 1979 b: Informe sobre la actividad sismica correspondiente al mes de marzo de 1979. Reporte mensual. Disponible en: http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Publicaciones_Periodicas/Boletines_Mensuales_Sismos/1979/Boletin_1979_03.pdf

SCHOSINSKY, G., 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, (34), 13-30.

SCHOSINSKY, G., & LOSILLA, M., 2000: Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central, (23).

SIGURDSSON, H., HOUGHTON, B., RYMER, H., STIX, J., MCNUTT, S., 1999: Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press.

SOTO, G.J., 1988a: Estructuras volcano-tectónicas del Volcán Turrialba, Costa Rica, América Central.-V Congreso Geol. Chileno, 8-12 de agosto de 1988, Santiago, Actas, III (I): 163-175.

SOTO, G.J., 1988b: Geología y vulcanología del Volcán Turrialba, Costa Rica. – Costa Rican Volcanism Workshop, 14-18 de noviembre de 1988, Washington, D.C. y Shenandoah National Park, 18 pp.

SOTO, G. J., 2012: Preparación de mapas de peligros volcánicos y restricción de uso de la tierra en el volcán Turrialba. Mapa de peligros volcánicos del volcán Turrialba, informe final. San José: Fundevi. pp. 183.

TASSI, F., VASELLI, O., FERNÁNDEZ, E., Duarte, E., Martínez, M., Delgado-Huertas, A. & Bergamaschi, F., 2009: Morphological and geochemical features of crater lakes in Costa Rica: an overview.- J. Limnol. 68(2): 193-205.

TERADA, A., HASHIMOTO, T. & KAGIYAMA, T., 2012: Water flow model of active crater lake at Aso Volcano, Japan: Fluctuations of magmatic gas and groundwater fluxes from underlying hydrothermal system. Bull Volcanol.doi:10.1007/s00445-011-0550-4

TOURNON, J., 1984: Magmatismes du Mesozoique a l' actuel en Amerique Centrale; L' exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andesites (PhD Dissertation): Paris, Université Pierre and Marie Curie, IIX + 335 p.

TRISTÁN, JF, 1923: La actividad del volcán Irazú en Costa Rica.- Zeitschr. Vulkanologie, 7 (2): 93-104.

TRISTÁN, JF, 1924: Reproducción del Documento inicial de don Diego de la Haya Fernández Sobre la Erupción en el Año de

VASELLI, O., TASSI, F., DUARTE, E., FERNANDEZ, E., POREDA, R., & DELGADO, A., 2010. Evolution of fluid geochemistry at the Turrialba volcano (Costa Rica) from 1998 to 2008. Bullettin of Vulcanology 72 (4), 397–410.

UGOLINI, F., DAHLGREN, R. A., 2002: Soil development in Volcanic Ash.-Global Environmental Research-English Edition. 6(2), 69-82.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas, para la Educación, la Ciencia y la Cultura), 2006: Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Documento Técnico No.4.

VON FRANTZIUS, A., 1861: Aporte al conocimiento de los Volcanes de Costa Rica.- En ZELEDÓN, E. (comp.) 1997: Viajes por la República de Costa Rica II.- Ed. Museo Nacional, San José: 19-162.

WAGNER, C. & SCHERZER, S., 1856: La República de Costa Rica en Centro América.- 217 págs. Traducido por Lines, J. (1944).- Ed. MCJD, San José.

WEISMAN, R. & BRUTSAERT, W., 1973: Evaporation and cooling of a lake under unstable atmospheric conditions. Water Resour Res 9:1242-1257

WUNDERMAN, R., 2003: Summary of recent volcanic activity.-Bulletin of Volcanology 65:458–459.

ANEXO 1: EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN MEDIANTE EL INFILTRÓMETRO TURF-TEC ®.

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO.

El infiltrómetro Turf-Tec es una estructura de doble anillo, cuyas dimensiones de anillos corresponden con: 6,03 cm de diámetro para el anillo interior y 10,29 cm para el anillo exterior.

El mismo se encuentra equipado por: un cronómetro con alarma, una regla o unidad de medida, una boya que se mueve conforme el nivel del agua desciende en el anillo inferior, otro anillo inferior horizontal que limita la profundidad de la prueba y asegura que sea la misma en todos los casos. (Figura 1).

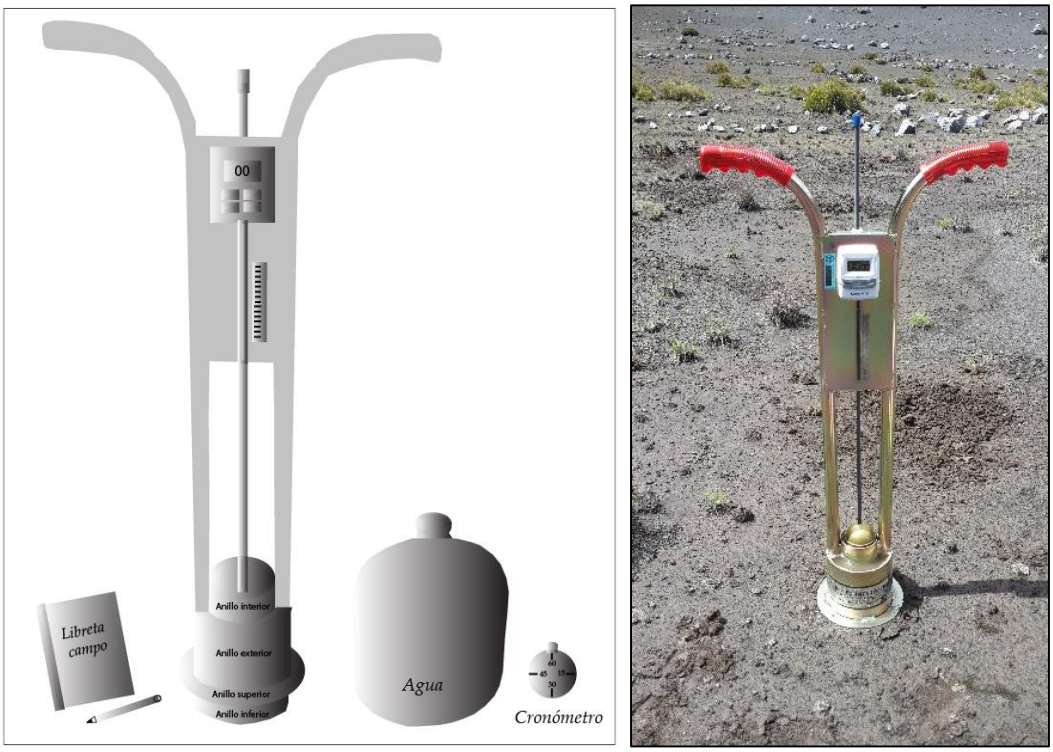


Figura 1: Infiltrómetro Turf-Tec ®, utilizado para las pruebas de infiltración.

Para la ejecución de pruebas de infiltración en la cima del volcán Irazú, se siguieron los siguientes pasos:

- Se introdujo el infiltrómetro en el terreno, hasta alcanzar la profundidad máxima del dispositivo.
- Llenado con agua de ambos anillos (exterior e interior), y posteriormente se inició la medición del descenso del agua en la escala.
- Se anotaron todas las mediciones de descenso del nivel del agua, en los tiempos correspondientes a: uno, cinco y quince minutos.
- Posteriormente se retiró el instrumento del suelo, y el agujero fue rellenado con el mismo material.
- Los valores obtenidos se introdujeron en una tabla de excel, y se multiplicaron según factores contenidos en el manual de uso del infiltrómetro Turf–Tec ® para finalmente obtener el valor de la tasa de infiltración.

ANEXO 2: PROCEDIMIENTOS SEGUIDOS EN EL LABORATORIO PARA LOS ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA, LIMITES DE ATTERBERG Y DENSIDAD APARENTE

Para el análisis granulométrico de las muestras, se siguieron los pasos en el laboratorio correspondientes a:

1. Preparación de la muestra y su secado por 24 horas en el horno. En la (figura 1), se puede observar parte de este procedimiento.
2. Se pesó la muestra con la que se iba a trabajar, y se colocó sobre la serie de tamices, correspondientes a: tamiz N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°140 y N°200.
3. La serie de tamices con la muestra dentro de los mismos, fueron colocados en el tamizador mecánico del laboratorio por diez minutos. Posterior a esto, la serie de tamizadores eran colocados en una mesa de trabajo.
4. Cada uno de los tamices fueron desprendidos de la serie vertical, para realizar veinticinco golpes manuales en menos de un minuto, en cada uno de los seis diferentes puntos equidistantes marcados en cada tamiz, con el fin de que el material de granulometría menor cayera a un recipiente sobre el cual se trabajaba, para finalmente recuperarlo y depositarlo al tamiz siguiente, con abertura de malla inferior (figura 2).
5. Se recuperó el peso retenido en cada malla, limpiando a su vez cada tamiz para obtener cualquier partícula o grano de material adherido a la ellas. Cada uno de los materiales recuperados fueron colocados en recipientes obtener su peso (figuras 3 y 4).
6. El peso de material recuperado se comparó con el peso original de la muestra, corroborando así que el margen de error fuera aceptable.

Figura 1: Etiquetado de recipientes y colocación de muestras en el horno.

Figura 2: Colocación de muestras en el set de tamices y en el tamizador mecánico.

Figura 3: Golpes en cada uno de los puntos equidistantes de los tamices, y limpieza de tamiz - obtención de materiales.

Figura 4: Peso de materiales individuales y recuperación de muestras en bolsas.

Figura 5: Ejemplo de resultados obtenidos, nótese las diversas granulometrías que conforman las muestras

- **Límite líquido y plástico:**

En algunas de las muestras se requirió la realización de los límites para determinar el tipo de suelo con el sistema de clasificación unificada de suelos, por lo cual se procedió al análisis en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR).

Los procedimientos más importantes en este laboratorio, correspondieron con:

Determinación del límite líquido

- Se utilizó el método húmedo para la preparación de la muestra, donde se pesaron 500 g de material con una humedad natural.

- Posterior a esto el material se pasó por la malla N°10 y N° 40, y el porcentaje pasando la malla N°40 se almacenó en un recipiente original, mientras que el retenido en la malla N°40 y malla N°10, se colocó en un mortero para mover suavemente y soltar partículas finas.
- El material del mortero fue colocado nuevamente sobre la malla N°40, para dejar pasar todos los finos presentes y sumarlo al recipiente original.
- Se unieron todos los materiales mayores a la malla N°40 y N°10, y se procedió al lavado del mismo, con el fin de eliminar todos los finos adheridos a los materiales más gruesos (figura 6).
- El material producto del lavado se decantó de forma natural y se retiró parte del agua que contenía la muestra. Una vez obtenido el material residual, este se unió al porcentaje de muestra original que había pasado la malla N°40, y se procedió a la mezcla homogénea del material hasta llegar a la consistencia deseada final. Posteriormente, la mezcla se almacenó en un recipiente cubierto por una bolsa para evitar pérdida de humedad, por unas 16 horas.
- Se procedió a sacar parte de la muestra para la colocación en la cuchara Casagrande manual (Figura 7), para que la muestra alcanzara la consistencia requerida. La cantidad de golpes inicial se aplicó entre 25 a 30 y a una velocidad de 1.9 - 2.1 golpes por segundo hasta que las dos mitades de las pastas del suelo estuvieran en contacto en el fondo del surco a lo largo de una distancia de 13 mm. Este procedimiento se repitió tres veces, para opciones de golpes entre los rangos (25 a 35, 20 a 30 y uno de 15 a 25).
- Se obtuvo una muestra de material de cada una de estas tres repeticiones de golpes, y se colocaron en recipientes con tapa, inicialmente pesados y posteriormente a la colocación de la muestra.
- Finalmente los materiales en recipientes sin tapa, fueron colocados en una bandeja dentro del horno para el secado por 24 horas o más, y proceder a determinar el diferencial de humedad inicial y la final.

Figura 6: Preparación de la muestra para el ensayo de límites.

Figura 7: Ensayo de limite líquido.

Límite Plástico

- Para el límite plástico se tomó una muestra de 20 g de material obtenido en la preparación inicial para el límite líquido, previo a la prueba con la máquina de Casagrande o posterior a la realización de la misma.
- Posteriormente esta masa de 20 g fue colocada en un recipiente abierto para el secado al aire del mismo, reduciendo el contenido de humedad llegando a una consistencia en la que se permitió el rodamiento de los materiales sin desintegración completa y sin pegarse en las manos.

- Se procedió a la formación de una masa helicoidal con 1,5 a 2 g, se enrolló la masa mediante el método manual por unos 2 minutos hasta obtener bastoncillos o cilindros de 3,2 mm de diámetro, los cuales se colocaban en dos recipientes con aproximadamente 6 g de este material cada uno (Figura 8).
- Finalmente los materiales en recipientes sin tapa, fueron colocados en una bandeja dentro del horno para el secado por 24 horas o más, y proceder a determinar el diferencial de humedad inicial y la final.

Figura 8: Ensayo de limite plástico.

- **Densidad aparente:**

Para la determinación de la densidad aparente de los materiales, se procedió a la extracción de muestras de suelo mediante cilindros con volumen conocido, los cuales se introducían en el terreno evitando compactar los mismos, posteriormente estos cilindros se extraían con palas y se cubrían con tapas para evitar pérdidas de material.

Los materiales fueron llevados a los laboratorios de LANAMME, donde se extraían las muestras de suelo del cilindro y se procedía a la colocación en recipientes para tomar el peso de la muestra en húmedo, posterior a lo cual la muestra se dejó secando por un mínimo de 36 horas en horno a 105 - 110°C. Luego se procedió a tomar el peso de la muestra en seco, y a aplicar las fórmulas para la obtención de densidad.

ANEXO 3: RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS DE MATERIALES POST-ERUPCIÓN OCTUBRE DEL 2014 - VOLCÁN TURRIALBA.

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

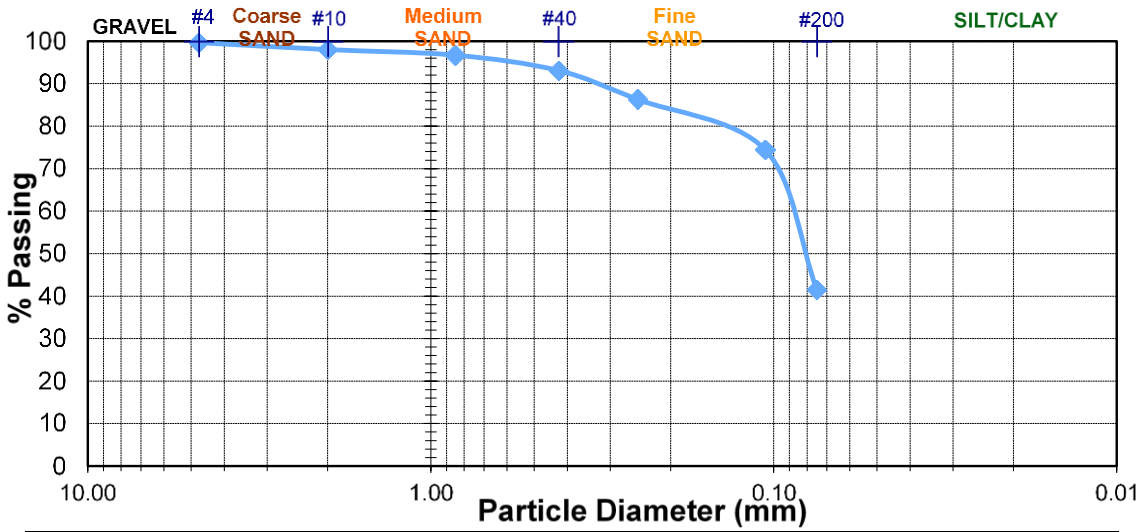
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

MUESTRA N° 1		UBICACIÓN: Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		
X	Y	
562727	222895	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 540 g

Número de malla	Diámetro	Suelo retenido (g)	Suelo Retenido (%)	Suelo pasando (%)
4	4.75	1	0,2	99,8
10	2.00	0,6	0,1	99,7
20	0.85	2,2	0,4	99,3
40	0.43	22	3,8	95,5
60	0.25	41,4	7,2	88,4
140	0.11	72,2	12,5	75,9
200	0.075	150,7	26,1	49,8
Pan		248,1	42,9	6,9
Total		537,2	93,1	



D_{10}:	0,0156	C_u:	5,76
D_{30}:	0,0478	C_c:	1,63
D_{60}:	0,0897		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

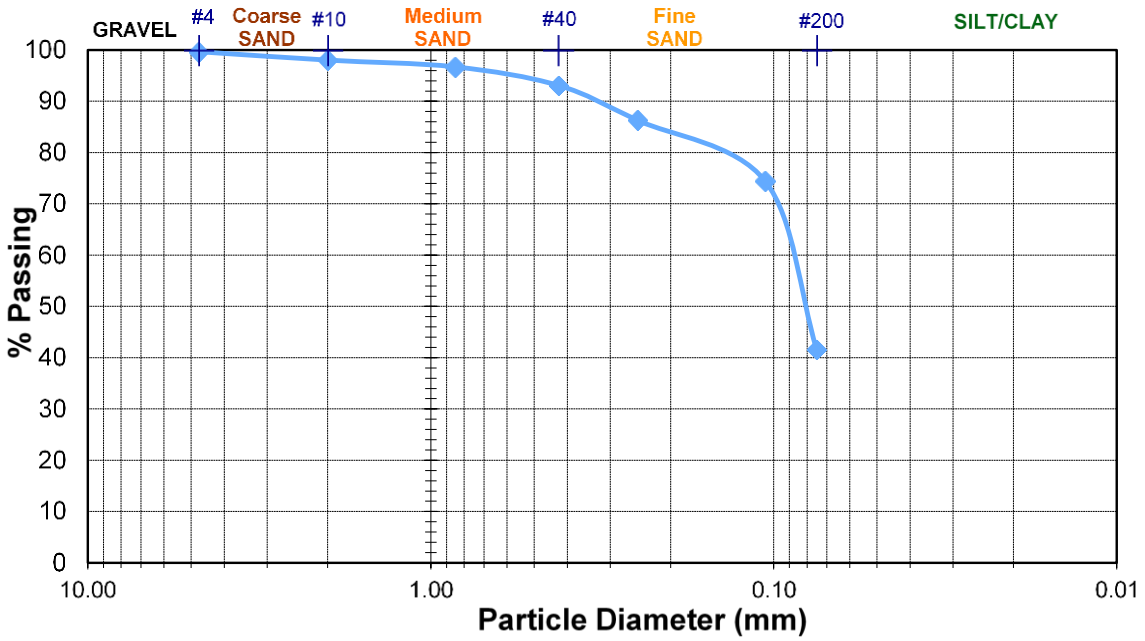
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

MUESTRA N° 2		UBICACIÓN: Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS		
X	Y	
562560	222741	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 578,0 g

Número de malla	Diámetro	Suelo retenido (g)	Suelo Retenido (%)	Suelo pasando (%)
4	4.75	1,0	0,2	99,8
10	2.00	2,0	0,3	99,5
20	0.85	2,5	0,4	99,0
40	0.43	10,0	1,7	97,3
60	0.25	50,0	8,7	88,7
140	0.11	80,0	13,8	74,8
200	0.075	200,0	34,6	40,2
Pan		230,0	39,8	0,4
Total		575,5	99,6	



D_{10}:	0,0178	C_u:	5,187
D_{30}:	0,055	C_c:	1,841
D_{60}:	0,0923		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

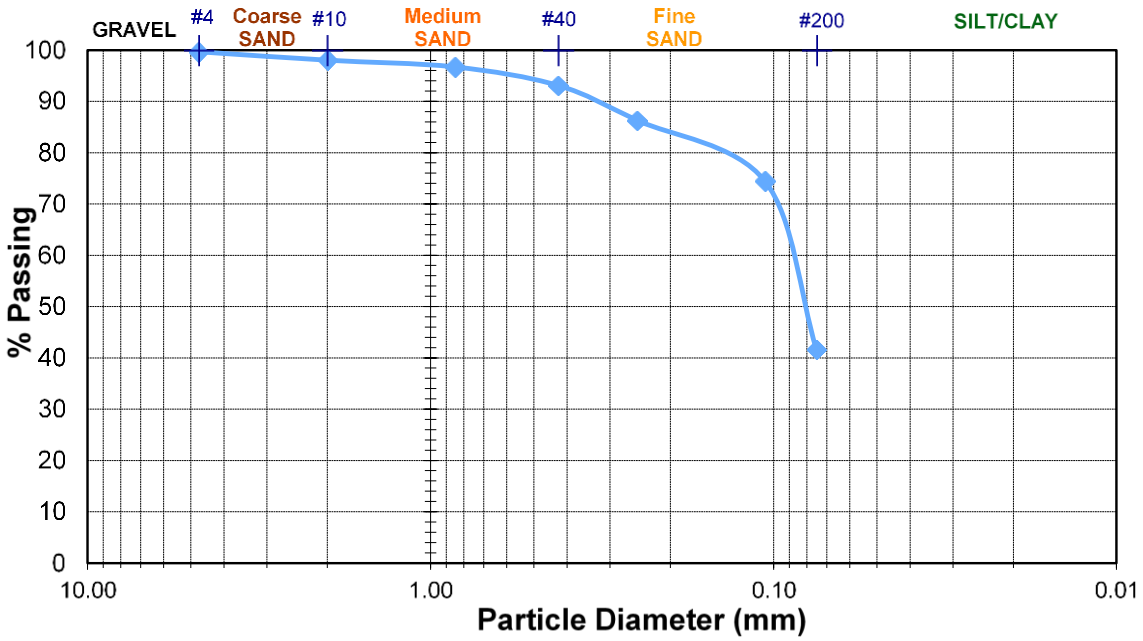
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

MUESTRA N° 3		UBICACIÓN: Cráter suroeste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		
X	Y	
562194	222533	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 609 g

Número de malla	Diámetro	Suelo retenido (g)	Suelo Retenido (%)	Suelo pasando (%)
4	4.75	2,0	0,3	99,7
10	2.00	10,0	1,6	98,0
20	0.85	8,0	1,3	96,7
40	0.43	22,0	3,6	93,1
60	0.25	41,4	6,8	86,3
140	0.11	72,2	11,9	74,4
200	0.075	200,0	32,8	41,6
Pan		248,1	40,7	0,9
Total		603,7	99,1	



D_{10}:	0,0166	C_u:	5,543
D_{30}:	0,0529	C_c:	1,837
D_{60}:	0,0919		

ANEXO 4: METODOLOGÍA UTILIZADA PARA DETERMINAR, EL ÁREA DE LA SUPERFICIE DEL LAGO QUE SE FORMA EN EL CRÁTER PRINCIPAL DEL VOLCÁN IRAZÚ

A continuación se presenta una breve descripción del método utilizado para determinar el área abarcada por la superficie del lago formado en el cráter Principal en diferentes momentos dentro del periodo de estudio. Para más detalles, consultar el Apéndice 1.

Limitantes del método:

a) En la mayoría de los casos, solo un porcentaje del borde del lago aparece en las fotografías, por lo que se tienen varios contornos parciales.

b) Por las dificultades logísticas, no ha sido posible obtener un contorno del lago utilizando GPS, como alternativa, se utilizó una imagen perpendicular de Google Earth®, para una fecha conocida (figura 1).

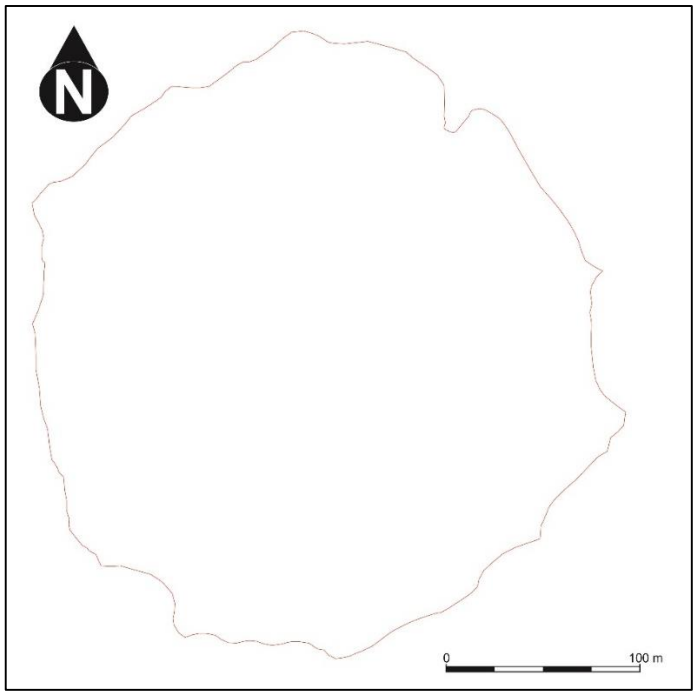


Figura 1: Contorno de la imagen perpendicular usada como guía en la rectificación.

Similitudes con el método Rouwet:

a) Se utilizan fotografías oblicuas.

b) Se utilizan puntos en común en las imágenes unidos mediante triángulos para la rectificación.

c) Se utiliza como referencia una imagen perpendicular.

d) Se puede calcular el porcentaje de error.

e) El resultado es un mapa topográfico del fondo del cráter estudiado.

f) Las imágenes son captadas desde el mirador, por diferentes personas utilizando distintos equipos fotográficos.

g) Se utiliza el software CorelDRAW ® para rectificar las imágenes.

Inicialmente se contaba con una base de datos que abarcaba todo el periodo de estudio, la cual debió ser filtrada considerando los factores anteriormente descritos, por lo cual quedaron únicamente diez imágenes que cumplían con los requisitos para realizar el estudio morfológico. Las fotografías fueron tomadas desde el mirador localizado al sur del cráter principal por tres diferentes fotógrafos (figura 2).

Figura 2: Selección de imágenes utilizadas en la implementación del método Rouwet. Los fotógrafos se indican con letras. a. Gerardo J. Soto; b. Yemerith Alpízar Segura; c. Raúl Mora Amador.

Después de realizar la selección de las fotografías a utilizar, se procedió a la ubicación de tres puntos en común en las mismas (figura 3), los cuales debían ser tres puntos morfológicos que no presentaran variación en el periodo de estudio (Rouwet, 2011), en este caso se tomaron los siguientes puntos:

1. Un abanico aluvial localizado en el borde oeste del lago.
2. Una cárcava en la orilla noroeste y;
3. Un dique basáltico en el borde noreste.

Figura 3: Puntos en común utilizados en la rectificación.

Las variaciones en distorsión de las imágenes se dieron como producto principalmente de: el tipo de cámara fotográfica utilizada, la apertura focal del lente, la posición en la cual fue captada la imagen y el sitio desde el cual fue tomada la fotografía. Para corregir esta distorsión, fue necesario ubicar en todas las imágenes los puntos de rectificación antes mencionados, y hacer coincidir los triángulos formados (figura 4), lo cual permitió eliminar la distorsión ortogonal existente entre las fotografías. Posteriormente, se ubicaron estos mismos puntos en la imagen perpendicular, para realizar la corrección por la oblicuidad de las imágenes.

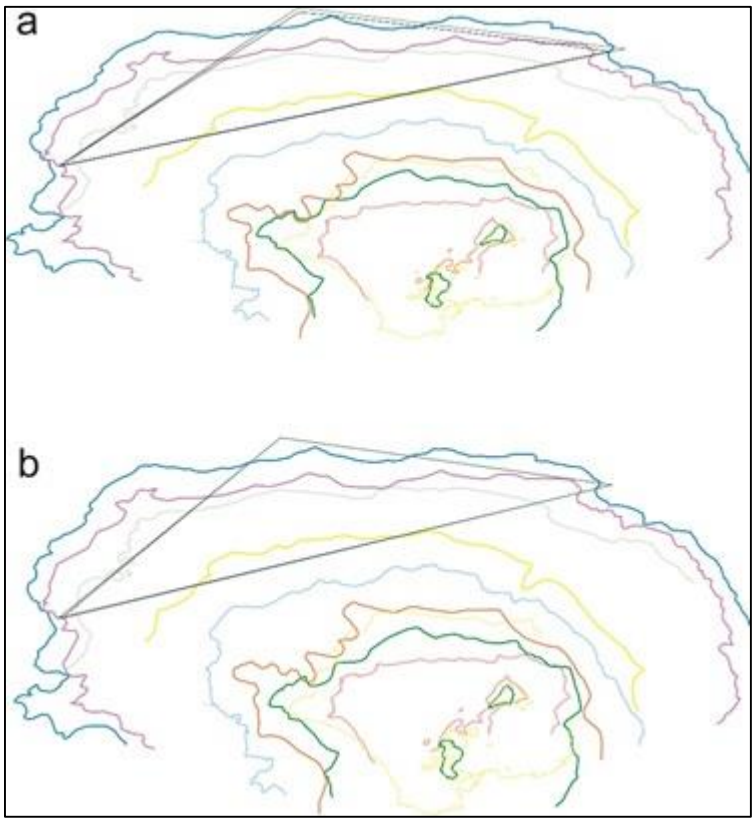


Figura 4: Contornos de las fotografías oblicuas antes (a) y después (b) de la rectificación.

Para la rectificación de las imágenes, se utilizó una imagen de alta calidad de Google Earth, sobre la cual se procedió a digitalizar el contorno del lago, así como a ubicar los puntos de rectificación, este sería el contorno base de la imagen.

Al aplicar el método fotográfico de Rouwet (2011), el resultado obtenido consistió en un mapa topográfico parcial del fondo del cráter, en el cual se distinguieron claramente las principales características geomorfológicas del fondo del lago (Figura 5). La flecha roja de la figura 5 señala la característica morfológica utilizada para estimar el error, el cual en este caso ha sido de 8 m (distancia máxima entre la misma característica morfológica después de la rectificación).

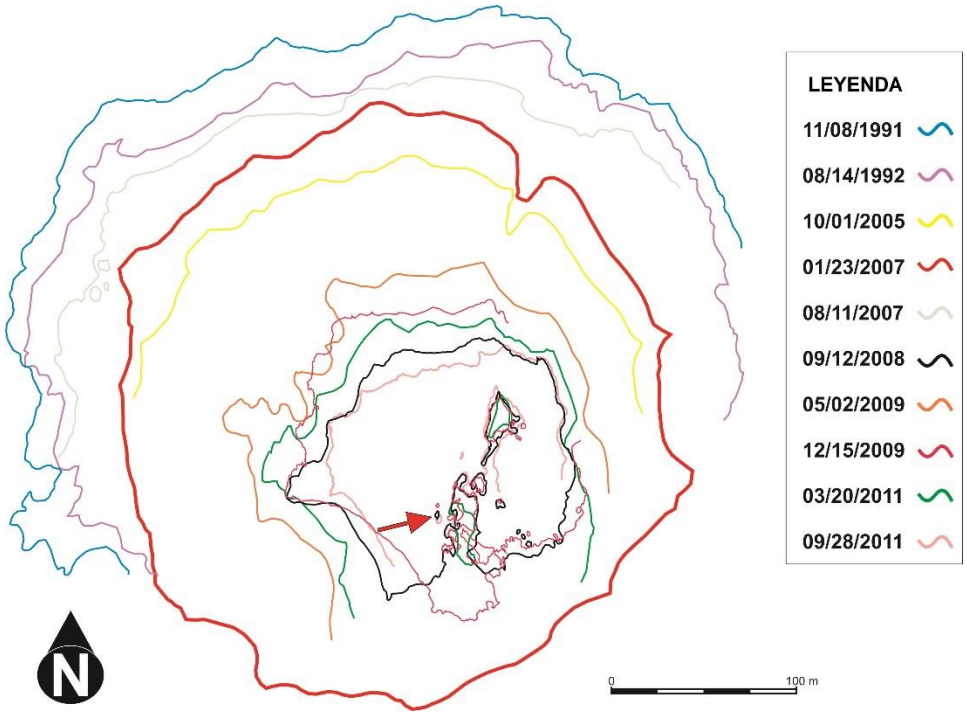


Figura 5: Mapa topográfico del cráter principal.

ANEXO 5: DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO Y FÓRMULAS APLICADAS

En este apartado se incluyeron todos los componentes, así como las fórmulas y principios definidos por Schosinsky (2006), para el cálculo y la obtención de cada uno de los balances hídricos realizados en la cima de los volcanes Turrialba e Irazú.

1. Fracción de lluvia interceptada por el follaje

Este componente, se considera muy importante, ya que el follaje retiene parte de la lluvia que cae dentro de un área definida, intervienendo así los parámetros de precipitación y de coeficiente de follaje definidos a continuación:

- ***Precipitación (P):***

Se define como todas aquellas aguas que caen en la superficie terrestre en cualquiera de las formas posibles (líquido, sólido, agua - nieve, niebla, entre otros) (FCIHS, 2009).

Los valores de precipitación se obtuvieron mediante solicitud formal de datos disponibles en el Instituto Meteorológico Nacinal (IMN), de las estaciones número: 73137 y 73143, respectivamente del volcán Irazú y volcán Turrialba (Cuadros 1, 2, 3 y figura 3).

Cuadro 1: Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Número	Nombre	Coordenadas			Altitud (m s.n.m.)	Periodo
		Lambert Norte	CRTM05	Geográficas		
73137	Volcán Irazú, Aut.	216809/ 554185	1102143/ 517847	09º58'08"/ 83º50'21"	3331	2005-2014
73143	Volcán Turrialba, Aut.	222385/ 563252	1107709/ 526919	10º01'09"/ 83º45'23"	3343	2010-2014

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.

La ubicación de las estaciones con respecto a las cimas de los volcanes se muestra en las figuras 1 y 2.

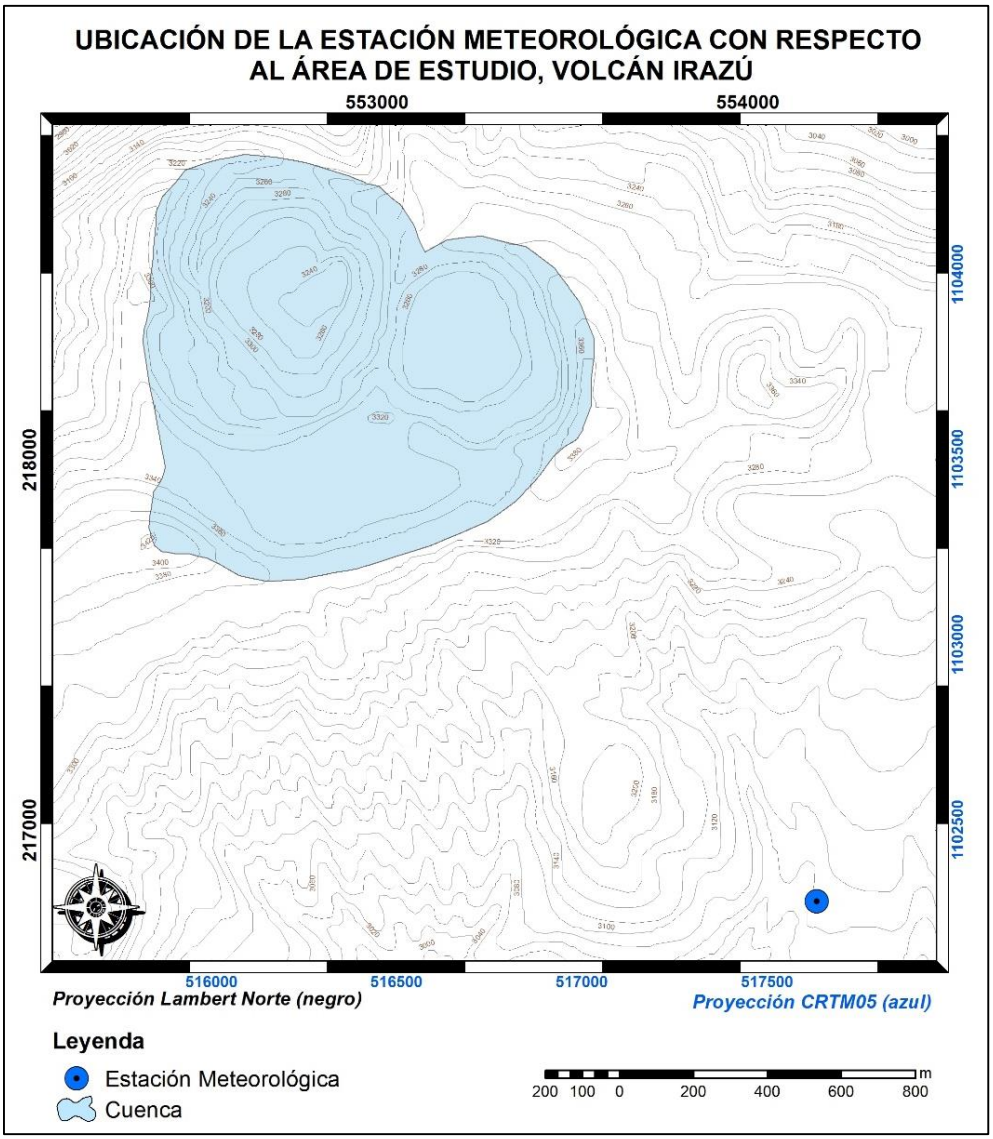


Figura 1: Ubicación de la estación meteorológica 73137.

Cuadro 2: Precipitación mensual en el volcán Irazú.

Precipitación (mm) volcán Irazú (2005 al 2014).													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL
2005	233,70	40,20	12,80	105,30	201,70	236,90	142,10	130,40	245,60	340,80	335,20	93,20	2117,90
2006	242,50	89,10	82,50	35,40	188,70	210,70	226,40	100,10	156,50	140,50	301,50	255,40	2029,30
2007	1,50	0,30	24,20	1,40	4,30	37,00	2,30	191,95	115,20	225,10	368,90	205,70	1177,85
2008	47,70	21,40	17,70	63,10	294,60	120,40	268,00	283,80	264,90	402,20	635,60	235,60	2655,00
2009	81,20	189,60	36,20	76,70	43,70	200,80	203,60	143,00	78,20	185,80	263,00	48,00	1549,80
2010	8,10	166,70	92,70	90,30	125,40	293,60	185,00	316,30	392,40	206,70	337,80	277,70	2492,70
2011	150,30	50,20	28,10	38,80	199,10	138,10	227,20	125,90	150,40	548,10	337,80	298,40	2292,40
2012	91,80	25,30	78,40	107,60	141,90	109,60	189,30	131,05	111,60	199,70	470,00	131,50	1787,75
2013	9,80	6,30	56,30	64,20	187,30	138,50	109,80	136,20	237,60	147,40	142,80	52,50	1288,70
2014	74,80	12,90	4,50	44,50	118,60	192,90	225,70	138,50	200,00	295,80	139,00	307,50	1754,70

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.

Cuadro 3: Precipitación mensual en el volcán Turrialba.

Precipitación (mm) volcán Turrialba (2010 al 2014).													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL
2010	384,8	309,8	224,1	144,3	191,7	296,6	194	320,5	373,6	307,7	463	1036,8	4246,9
2011	455,3	167,5	83,6	57	244,1	149,7	219,8	128,2	212,8	547,1	593,8	774,5	3633,4
2012	314,3	60,4	216,7	70,2	206,4	233,4	306,8	162,5	193,3	181,5	415,7	220,2	2581,4
2013	34,5	21,5	77,5	79,7	206,1	217	217,7	200,5	205	202,1	270,2	214,2	1945,9
2014	121,6	55,35	64,4	90,5	121,5	297,2	424,2	155,6	216,6	222,6	124,7	208,2	2102,45

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.

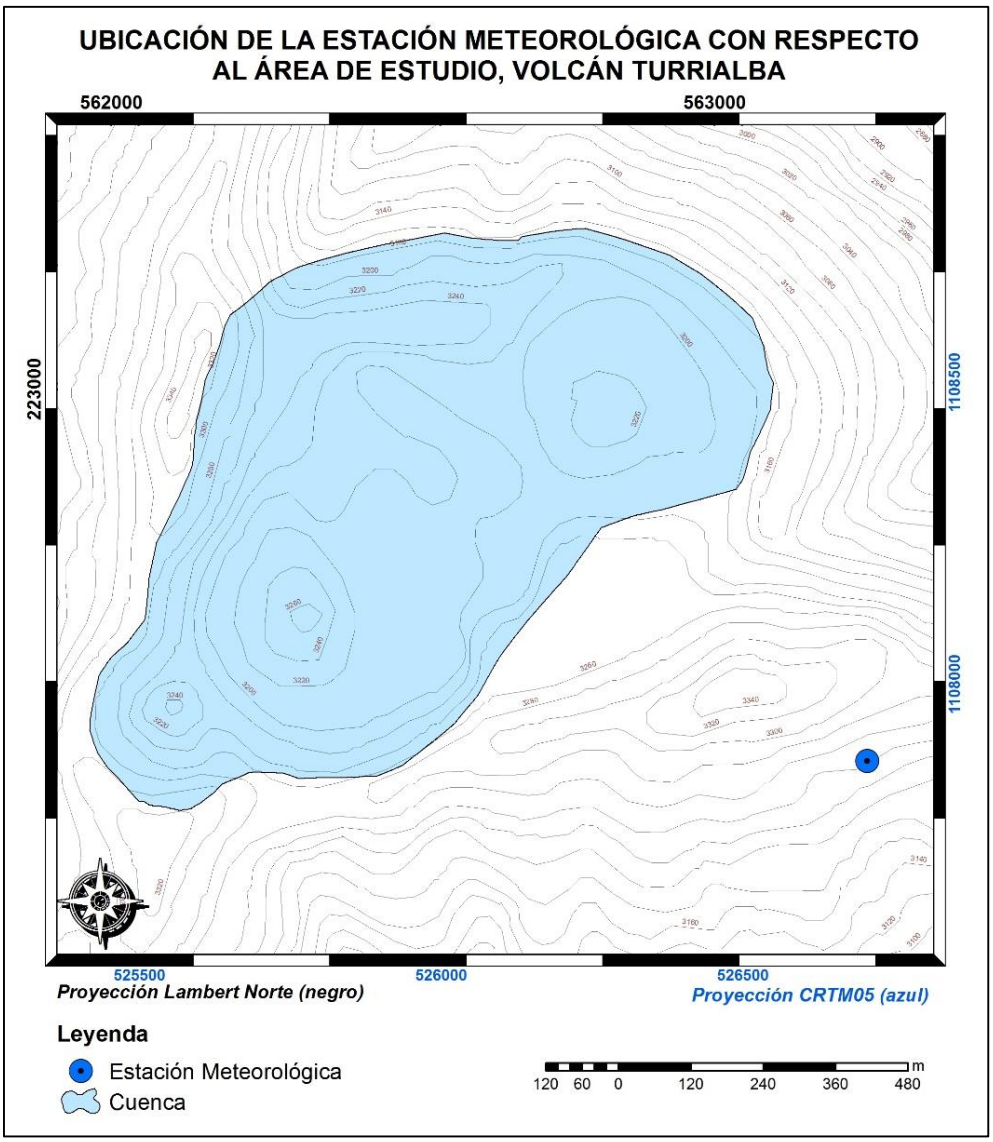


Figura 2: Ubicación de la estación meteorológica 73143.

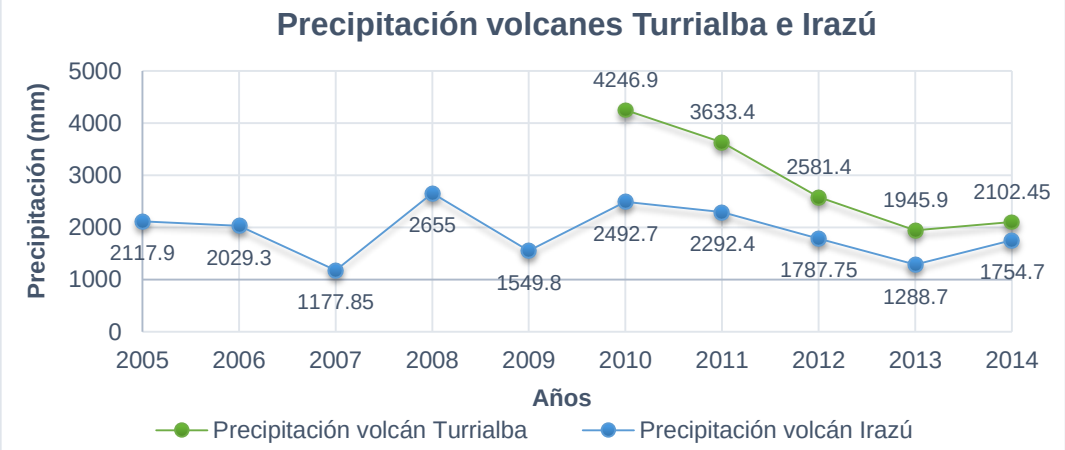


Figura 3: Gráfico comparativo de los valores de precipitación entre los volcanes Irazú y Turrialba para el periodo de estudio. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.

- ***Follaje (Cfo):***

El follaje corresponde al conjunto de hojas y ramas de un arbusto o una planta, el cual retiene parte de la lluvia que precipita en una zona determinada. Schosinsky (2006), indica que para efectos de un balance hídrico, se debe asignar un coeficiente de retención del follaje, adimensional y denominado como Cfo, determinando que: para bosques muy densos Cfo es igual a 0,20, mientras que para otro tipo de follajes se debe asignar un valor de Cfo igual a 0,12.

Para el cálculo de la retención mensual de lluvia por follaje se utilizó la ecuación 1.

Ecuación 1:

Si P≤5 mm/mes, **Ret = P.**

Si (P)*(Cfo) ≥ 5 mm/mes, **Ret = (P)*(Cfo).**

Si P>5 mm/mes y (P)*(Cfo)<5, **Ret = 5.**

Donde:

P= Precipitación mensual del mes (mm/mes), **Ret=** Retención de lluvia en el follaje (mm/mes) **Cfo=** Coeficiente de retención del follaje (para bosques muy densos **Cfo=** 0,20, mientras que para otros casos el **Cfo=** 0,12 (adimensional).

2. Infiltración básica del suelo (fc)

La infiltración corresponde con la penetración de agua en el suelo, procedente de la lluvia, cursos superficiales o recarga artificial (FCIHS, 2009). Según Schosinsky (2006), varios parámetros influyen en la cantidad de infiltración de lluvia en el suelo, que va a depender de: la fracción que infiltra por textura del suelo, la fracción que infiltra por efecto de la pendiente, la fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal y el coeficiente de infiltración del suelo.

- **Fracción que infiltra por textura del suelo (Kfc):**

Está definida como un coeficiente por la textura del suelo, el cual depende de los valores de infiltración obtenidos en el campo. En la ecuación 2 se puede observar cómo se calculó este coeficiente y parte de la definición del mismo.

Ecuación 2:

Si fc está entre 16 y 1568 mm/día, **kfc = 0,267ln(fc) – 0,000154fc – 0,723**

Si fc<16 mm/día, **kfc = 0,0148 fc/16**

Si fc>1568 mm/día, **kfc = 1**

Donde:

Kfc= Coeficiente de infiltración o fracción que infiltra por textura del suelo (adimensional) y **fc=** Infiltración básica del suelo (mm/día).

- ***Fracción que infiltra por efecto de pendiente (kp)***

La presente fracción por efecto de la pendiente, corresponde con una variable adimensional, establecida con base a tablas donde se indican rangos de pendientes y según estos rangos se estableció el valor de Kp, tal y como se observa en el cuadro 4.

Cuadro 4: Componentes del coeficiente de infiltración por pendiente.

Por pendiente	Pendiente (%)	Pendiente (°)	Kp
Muy plana	0,02% - 0,06%	0,01145° - 0,03437°	0,30
Plana	0,3% - 0,4%	0,17° - 0,2°	0,20
Algo plana	1% - 2%	0,57293° - 1,,14576°	0,15
Promedio	2% - 7%	1.14576° - 4°	0,10
Fuerte	mayor de 7%	> 4	0,06

Fuente: Schosinsky & Losilla (2000).

- **Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (Kv)**

El valor asignado para el Kv en el terreno de estudio, se estableció mediante valores disponibles en el cuadro 5.

Cuadro 5: Componentes del coeficiente de infiltración por cobertura vegetal.

Uso - Cobertura de la tierra	KV
Área urbana	0,05
Áreas quemadas	0,10
Cultivos permanentes	0,10
Paramos	0,18
Pastos	0,17
Terreno descubierto	0,10
Terrenos rocosos	0,05
Uso mixto	0,15

Fuente: Saborío, 2014.

- **Vegetación**

La vegetación presente en el área de estudio corresponde con páramo, el cual es una formación vegetal de alta montaña, heterogénea, generalmente desarbolada

o con doseles abiertos de arbolitos tupidos, localizados en las partes altas por encima de los 3100 metros de elevación (Mora, 2010).

De acuerdo con Luteyn (2005) el páramo se divide en tres categorías según sus pisos altitudinales, primero el subpáramo arbustivo transicional o páramo bajo (2-3 a 7-10 m de alto); el páramo propiamente dicho o páramo de gramíneas o poaceas (0,25-0,5 a 2-3 m de alto) y; el superpáramo o páramo desértico (menos de 0,25-0,5m de alto).

En Costa Rica el piso que se puede encontrar en mayor nivel es el subpáramo, que consiste en una zona transicional dominada por arbustos, localizada por lo general entre las cotas de 3000 y 3500 m s.n.m. En los sectores más elevados de la Cordillera de Talamanca, este tipo de vegetación se encuentra en abundancia, además existen áreas cuya extensión es menor a las encontradas en esta cordillera, en este caso, a lo largo de los cráteres de los volcanes más altos de la Cordillera Volcánica Central, tales como el Irazú y el Turrialba (Mora, 2010).

- **Coeficiente de infiltración del suelo (Ci):**

Para la determinación del coeficiente de infiltración, se utilizó la ecuación 3.

Ecuación 3:

$$\text{Si } kp + kv + kfc > 1, \quad Ci = 1.$$

$$\text{Si } kp + kv + kfc \leq 1, \quad Ci = kp + kv + kfc.$$

Donde:

Ci= Coeficiente de infiltración (adimensional), **kp=** Fracción que infiltra por efecto de pendiente (adimensional), **kv=** Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (adimensional) y **kfc=** Fracción que infiltra por textura del suelo (adimensional).

3. **Infiltración pluvial mensual (Pi):**

La precipitación que infiltra mensualmente al suelo se encuentra definida en la siguiente ecuación:

Ecuación 4:

$$Pi = (Ci)(P-Ret)$$

Donde:

Pi= Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en (mm/mes) y **Ci=** Coeficiente de infiltración (adimensional).

4. Escorrentía superficial (ESC):

Corresponde a la fracción de precipitación que no se infiltra en el terreno y circula por la superficie (FCIHS, 2009).

Ecuación 5:

$$ESC = P-Ret-Pi$$

Donde:

ESC= Escorrentía superficial en mm/mes, **P=** Precipitación en mm/mes, **Ret=** Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes y Pi= Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

5. Evapotranspiración

Se define como la suma de la evaporación y la transpiración en áreas cubiertas de vegetación (FCIHS, 2009). Debido a que en la práctica es casi imposible cuantificar cada uno de ellos por separado, se definen y determinan dos conceptos de evapotranspiración, que forman parte de los componentes del balance hídrico aplicado en el presente estudio, correspondientes a: evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración real tentativa promedio ocurrida durante el mes (ETPR) y evapotranspiración real promedio de la zona ocurrida durante el mes (ETR).

Evapotranspiración potencial (ETP):

Es la evapotranspiración que se produciría en teoría, si se cumplieran dos hipótesis: que exista un desarrollo vegetativo óptimo y que la humedad del suelo

coincida con su capacidad de campo (FCIHS, 2009). De hecho, se aplica a la evapotranspiración que se produce si la humedad del suelo es suficiente para que la vegetación absorba toda el agua que necesita sin limitación alguna por la sequedad del suelo (FCIHS, 2009). Este valor de evapotranspiración se obtuvo a partir de la ecuación 6, de Blaney & Criddle (ONU, 1972).

Ecuación 6:

$$ETP\ (mm/mes) = (8{,}10+0{,}46T)*Ps$$

Donde:

ETP= Evapotranspiración potencial (mm/mes), **T=** Temperatura media mensual en (grados centígrados), **Ps=** Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año.

Dentro de la ecuación 6, intervienen los parámetros correspondientes a porcentaje de horas de luz solar mensual y temperatura media mensual, los cuales se describen a continuacion.

- **Porcentaje de horas de luz solar mensual (Ps):**

Los valores de porcentaje de horas luz solar mensual que se deben aplicar a un balance, según Schosinsky (2006), dependen de la ubicación del país, tanto de la latitud como del hemisferio en que se encuentre el mismo, para lo cual existen tablas que indican estos valores.

Costa Rica se ubica en la latitud 10° del hemisferio norte, para la cual (Calvo, 1999) indica que los valores mensuales a utilizar, corresponde a los expuestos en el cuadro 6.

Cuadro 6: Porcentaje de horas de luz solar mensual para la latitud 10º.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
%	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10

Temperatura media mensual (T).

La temperatura media mensual corresponde con los valores medios mensuales de temperatura en grados centígrados, obtenidos mediante las mismas estaciones meteorológicas utilizadas para la determinación de la precipitación de las zonas de estudio, gracias al aporte del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN). En la figura 4, y los cuadros 7 y 8, se muestran las variaciones de temperatura media mensual para ambos volcanes.

Cuadro 7: Temperatura media mensual en el volcán Irazú.

Temperatura media en °C. volcán Irazú (2005 al 2014)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PROMEDIO
2005	7	9.1	9.8	9.5	9	9.2	8.6	8.1	8.1	8.7	7.6	7.4	8.5
2006	7.1	7.7	8.3	9	9.4	8.5	7.9	8.1	8.5	8.7	8.2	7.9	8.2
2007	7.9	8.3	8.2	9.1	9.3	8.6	7.7	8.3	8.3	8.1	7.2	6.7	8.1
2008	6.7	7.4	8	8.5	8.6	8.1	7.6	7.9	8.4	7.9	7.8	6.5	7.8
2009	7	6.4	9.4	9.8	9	9	7.7	8.1	8.7	8.5	8.4	8.4	8.4
2010	8.6	9.5	10.5	9.9	9.5	8.7	8.6	8.7	8.4	8.8	8.1	7.2	8.9
2011	7.8	7.8	7.9	9.4	9.4	9.1	8.3	8.8	8.9	8.3	7.9	7.2	8.4
2012	6.7	7.7	8.3	9.4	9.6	8.9	7.7	8.6	8.1	8.3	7.7	7.4	8.2
2013	8.4	9	9.3	9.9	9	8.3	7.2	7.7	8.5	8.1	7.4	7.1	8.3
2014	7.6	8	8.7	8.8	9.2	8.5	9.1	7.9	8.1	8.1	7.6	7.3	8.2

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.

Cuadro 8: Temperatura media mensual en el volcán Turrialba.

Temperatura media en °C. volcán Turrialba (2010 al 2014).													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PROMEDIO
2010	10.6	10.7	10.8	10	9.5	8.8	8.8	8.8	8.8	8.6	7.9	6.8	9,2
2011	7.3	7.1	7.3	9	9.3	8.9	8	8.4	8.6	8	7.8	7.1	8.3
2012	6.5	7.3	8.1	9.4	9.7	9	7.8	8.6	8.1	8.4	7.8	7.6	8,2
2013	8	8.7	9.5	10.1	9.1	9	8	8.6	9.3	8.9	8.3	7.6	8.3
2014	8.1	8.7	9.2	9.3	9.8	9.2	8.4	8.3	8.7	8.9	6.1	3.8	8,2

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2015.

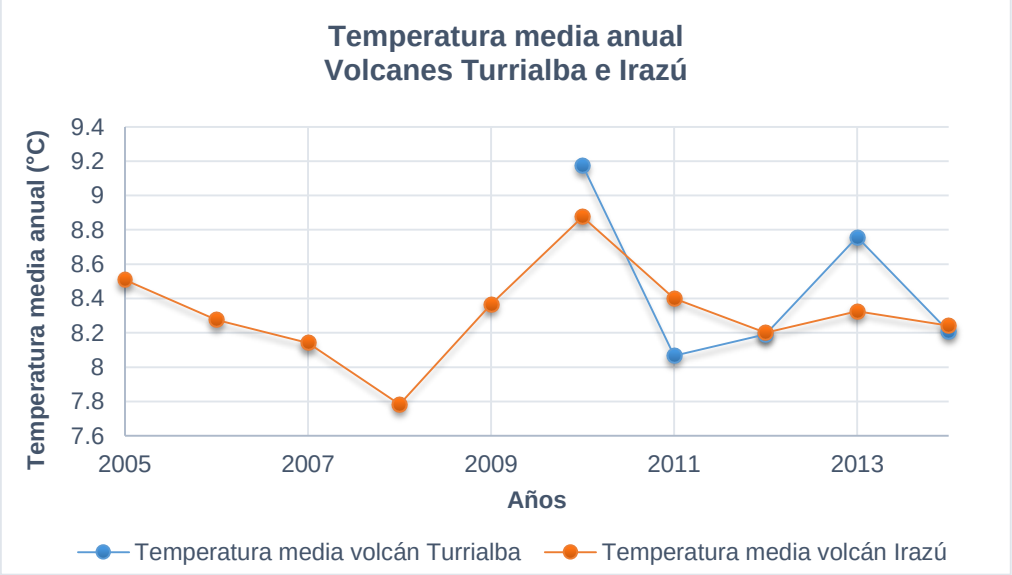


Figura 4: Temperatura media mensual en los volcanes Irazú y Turrialba.

6. **Evapotranspiración real tentativa promedio, ocurrida durante el mes (ETPR).**

Como la infiltración y la evapotranspiración ocurre durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de coeficiente de humedad máximo (C1) y coeficiente de humedad mínimo (C2); esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado es:

Ecuación 7:

$$ETPR\ (mm/mes) = ((C1+C2)/2)\ ETP$$

Donde:

ETPR= Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes (mm/mes), **C1=**Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración, **C2=**Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1 y **ETP=**Evapotranspiración potencial (mm/mes).

El detalle de los parámetros involucrados en la ecuación 7 de acuerdo con Schosinsky (2006), se presentadan a continuación:

- **Coeficiente de Humedad al final del mes, antes de que ocurra la evapotranspiración (C1).**

Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (HSi). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) vendría a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no consideramos la evapotranspiración, el coeficiente de humedad, al final del mes, sería (C1):

Ecuación 8:

$$C1 = (HSi - PM + Pi)/(CC-PM)$$

Donde:

C1= Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración, **Hsi=** Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en (mm), **PM=** Punto de marchitez en (mm), **Pi=** Precipitación que infiltra en (mm/mes) y **CC=** Capacidad de campo en (mm).

- **Capacidad de campo (CC):**

La capacidad de campo se define como el grado máximo de humedad de un suelo cuando pierde toda el agua por efecto de la gravedad. Representa el agua que retiene el terreno al cabo de unas horas, o días tras una fuerte lluvia o riego y que posteriormente podrán utilizar parcialmente las plantas para sus funciones vitales (FCIHS, 2009).

El valor de capacidad de campo fue determinado, por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), induciendo las muestras a una tensión equivalente a 1/3 de atm, hasta obtener el porcentaje de humedad retenida bajo esas condiciones.

- **Profundidad de las raíces en la vegetación de páramo**

De acuerdo con Kappelle (2005), para el páramo presente en el área de estudio, el espesor del suelo se define como la profundidad máxima hasta donde las raíces pueden alcanzar sin mayor dificultad. Estas clasificaciones se establecen según las especies vegetales presentes. Se reconocieron cuatro clases de profundidad:

a. Muy superficial (menor de 25 cm).
b. Superficial (de 25 a 50 cm).
c. Moderadamente profunda (de 50 a 100 cm).
d. Profunda (mayor de 100 cm).

- **Punto de marchitez (PM):**

Se define como el agua que retiene el suelo con tal fuerza, que las plantas son incapaces de extraer por succión (FCIHS, 2009).

El valor de punto de marchitez, fue determinado por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), induciendo las muestras a una presión equivalente a 15 atm, hasta obtener el porcentaje de humedad retenida bajo esas condiciones.

- **Humedad al inicio del mes (HSi):**

Para asignar el valor de la humedad inicial del suelo para cada balance hídrico se utilizó la técnica de Schosinsky (2006), donde se menciona que conociéndose las humedades del suelo correspondientes a capacidad de campo o punto de marchitez y teniendo valores de precipitación y de evapotranspiración de una zona, se puede determinar este valor. Schosinsky (2006), indica que en Costa Rica, al finalizar la época de mayor precipitación, es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, por lo cual se eligieron meses consecutivos donde la precipitación que infiltraba mensualmente superara la evapotranspiración potencial mensual, asignando al mes siguiente de los seleccionados, el valor de la capacidad

de campo obtenida en el sector de estudio, la cual sería igual al valor de humedad incial asignada al suelo.

- **Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración (C2).**

El coeficiente (C2), se determinó considerando que la evapotranspiración ocurre una vez ocurrida la infiltración, por lo cual el coeficiente de humedad, al final del mes fue determinado mediante la ecuación 9.

Ecuación 9:

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC-PM)$$

$$ETR1 = (C1)(ETP)$$

Donde:

C2= Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración, **ETR1=** Evapotranspiración potencial real (mm/mes), considera la humedad correspondiente al coeficiente **C1 y ETP=** Evapotranspiración potencial (mm/mes).

7. **Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes (ETR).**

La evapotranspiración real promedio de la zona se determinó mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 10:

$$\text{Si } ((C1+C2)/2)ETP \leq HD, \quad ETR \text{ (mm/mes)} = ((C1+C2)/2)ETP$$

$$\text{Si } ((C1+C2)/2)ETP > HD, \quad ETR \text{ (mm/mes)} = HD$$

Donde:

ETR= Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes (mm/mes), **C1=** Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la

evapotranspiración (adimensional), **C2=** Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1, (adimensional), **ETP=** Evapotranspiración potencial (mm/mes) y **HD=** Humedad disponible (mm/mes)

- **HD = Humedad disponible (mm/mes).**

Es aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar (Schosinsky, 2006).

Ecuación 11:

$$HD\ (mm/mes) = HSi + Pi - PM$$

Donde:

HD= Humedad disponible (mm/mes), **Hsi=** Humedad de suelo inicial (al inicio del mes) (mm), **Pi=** Precipitación que infiltra (mm/mes) y **PM=** Punto de marchitez (mm).

8. Recarga potencial del acuífero (RP)

Para que ocurra una recarga de agua hacia el acuífero, se debe cumplir que el agua que infiltra sea suficiente como para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas (Schosinsky, 2006).

Ecuación 12:

$$RP = Pi + HSi - HSf - ETR$$

Donde:

Rp= Recarga potencial mensual en mm/mes, **Pi=** Precipitación que infiltra en mm/mes, **HSf=** Humedad del suelo al final del mes en mm, **ETR=** Evapotranspiración real en mm/mes y **HSi=** Humedad del suelo inicial (inicio de mes) (mm).

- **Humedad del suelo final (HSf)**

La humedad del suelo al final de cada mes se calculó mediante la ecuación 13.

Ecuación 13:

$$\text{Si } (HD+PM-ETR)<CC,\ HSf=HD+PM-ETR$$

$$\text{Si } (HD+PM-ETR)\geq CC,\ HSf=CC$$

Donde:

HSf= Humedad del suelo final (final de mes) (mm), **HD=** Humedad disponible (mm/mes), **PM=** Punto de marchitez (mm), **ETR=** Evapotranspiración real (mm/mes) y **CC=** Capacidad de campo (mm).

Nota: La HSf en ningún momento puede ser mayor a la CC.

ANEXO 6: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN REALIZADAS EN EL VOLCÁN IRAZÚ.

Resultados de Pruebas de Infiltración - Turf Tec				
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 1	552697/217859	1	5	15
Mediciones(cm)		0.15	0.7	2
Infiltración en cm/hora		9	8.4	8
Valor de infiltración		8.47		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M#2	552912/217831	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.3	1.2	3.2
Infiltración en cm/hora		18	14.4	12.8
Valor de infiltración		15.07		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 3	552662/217972	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1	4.5	12.05
Infiltración en cm/hora		60	54	48.2
Valor de infiltración		54.07		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 4	552983/217969	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.1	0.4	1.1
Infiltración en cm/hora		6	4.8	4.4
Valor de infiltración		5.07		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 5	552452/217819	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.2	0.95	3
Infiltración en cm/hora		12	11.4	12
Valor de infiltración		11.8		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 6	552487/217988	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.8	3.2	8.1
Infiltración en cm/hora		48	38.4	32.4
Valor de infiltración		39.6		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 7	552566/218039	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1	3	7.5
Infiltración en cm/hora		60	36	30
Valor de infiltración		42		

Resultados de Pruebas de Infiltración - Turf Tec				
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 8	552412/218061	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1.1	4	7.8
Infiltración en cm/hora		66	48	31.2
Valor de infiltración		48.4		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 9	552658/218260	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		6	20	48
Infiltración en cm/hora		360	240	192
Valor de infiltración		264		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 10	552513/218303	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		3.1	13.5	37
Infiltración en cm/hora		186	162	148
Valor de infiltración		165.33		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 11	552446/218422	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		2	8	20.6
Infiltración en cm/hora		120	96	82.4
Valor de infiltración		99.47		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 12	552398/218606	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1.6	7	19
Infiltración en cm/hora		96	84	76
Valor de infiltración		85.33		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 13	552390/218256	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		3.5	13	37
Infiltración en cm/hora		210	156	148
Valor de infiltración		171.33		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 14	553098/218635	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1	3.5	8
Infiltración en cm/hora		60	42	32
Valor de infiltración		44.67		

Resultados de Pruebas de Infiltración - Turf Tec				
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 15	552971/218747	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1	4.3	11.05
Infiltración en cm/hora		60	51.6	44.2
Valor de infiltración		51.93		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 16	553244/218346	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.1	0.6	1.6
Infiltración en cm/hora		6	7.2	6.4
Valor de infiltración		6.53		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 17	553246/218433	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.61	1.9	5
Infiltración en cm/hora		36.6	22.8	20
Valor de infiltración		26.47		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 18	553263/218352	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.2	1.2	3.2
Infiltración en cm/hora		12	14.4	12.8
Valor de infiltración		13.07		
Resultados de Pruebas de Infiltración - Turf Tec				
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 19	553264/218220	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		3.1	13.5	37
Infiltración en cm/hora		186	162	148
Valor de infiltración		165.33		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 20	553305/218329	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1.6	7.3	20.6
Infiltración en cm/hora		96	87.6	82.4
Valor de infiltración		88.67		

Resultados de Pruebas de Infiltración - Turf Tec				
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 21	553285/218279	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1.2	5.5	16.46
Infiltración en cm/hora		72	66	65.84
Valor de infiltración		67.95		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 22	553344/218307	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		5	24	50
Infiltración en cm/hora		300	288	200
Valor de infiltración		262.67		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 23	553382/218264	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1.9	7.8	19.9
Infiltración en cm/hora		114	93.6	79.6
Valor de infiltración		95.73		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 24	551842/218486	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0.1	0.3	0.5
Infiltración en cm/hora		6	3.6	2
Valor de infiltración		3.87		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 25	552929/218224	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		0	0.15	0.2
Infiltración en cm/hora		0	1.8	0.8
Valor de infiltración		0.87		
Número de prueba	**Coordenadas**	***Tiempo mediciones (minutos)***		
M# 26	552819/218568	**1**	**5**	**15**
Mediciones(cm)		1.5	6.1	7
Infiltración en cm/hora		90	73.2	28
Valor de infiltración		63.73		

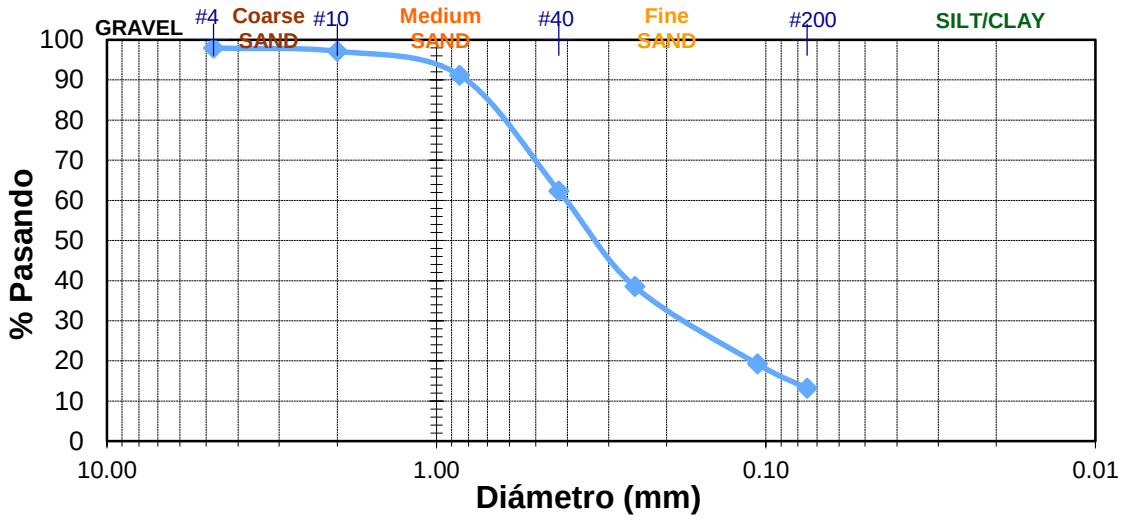
ANEXO 7: RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS, CIMA DEL VOLCÁN IRAZÚ.

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO **Fecha de toma de muestra: 26 de marzo del 2014.**	
MUESTRA N° 1	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM Arena limosa con buena gradación.
X / **552733**	**Y** / **218011**

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 725.3 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	15,0	2,1	97,9
10	2.00	5,7	0,8	97,1
20	0.85	43,3	6,0	91,2
40	0.43	209,4	28,9	62,3
60	0.25	172,7	23,8	38,5
140	0.11	139,8	19,3	19,2
200	0.075	43,9	6,1	13,2
Pan		93,3	12,9	0,3
Total		723,1	99,7	



D_{10}:	0,0558	C_u:	9,358
D_{30}:	0,216	C_c:	1,602
D_{60}:	0,522		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
Fecha de toma de muestra: 26 de marzo del 2014.

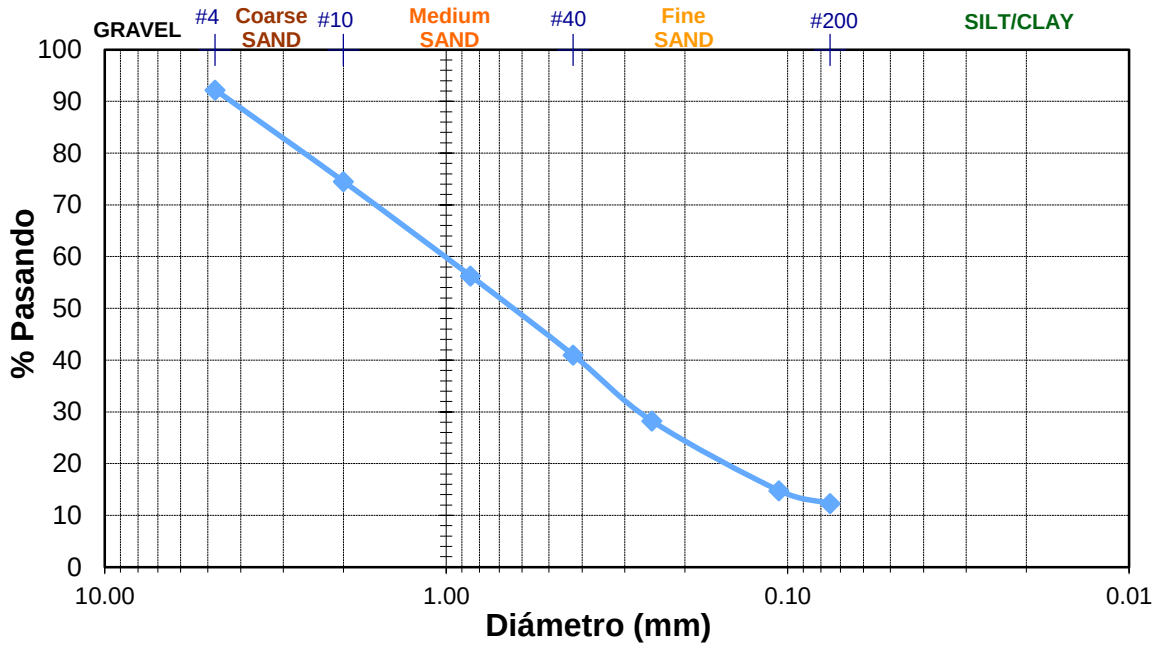
MUESTRA N° 2	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM Arena limosa con buena gradación.

X	Y
552697	217859

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 710,9 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	55,5	7,8	92,2
10	2.00	125,7	17,7	74,5
20	0.85	129,6	18,2	56,3
40	0.43	108,9	15,3	41,0
60	0.25	90,5	12,7	28,2
140	0.11	95,7	13,5	14,8
200	0.075	17,6	2,5	12,3
Pan		87,1	12,3	0,0
Total		710,6	100	



D_{10}:	0,0601	C_u:	17,902
D_{30}:	0,3753	C_c:	2,175
D_{60}:	1,0767		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
Fecha de toma de muestra: 22 de abril del 2014.

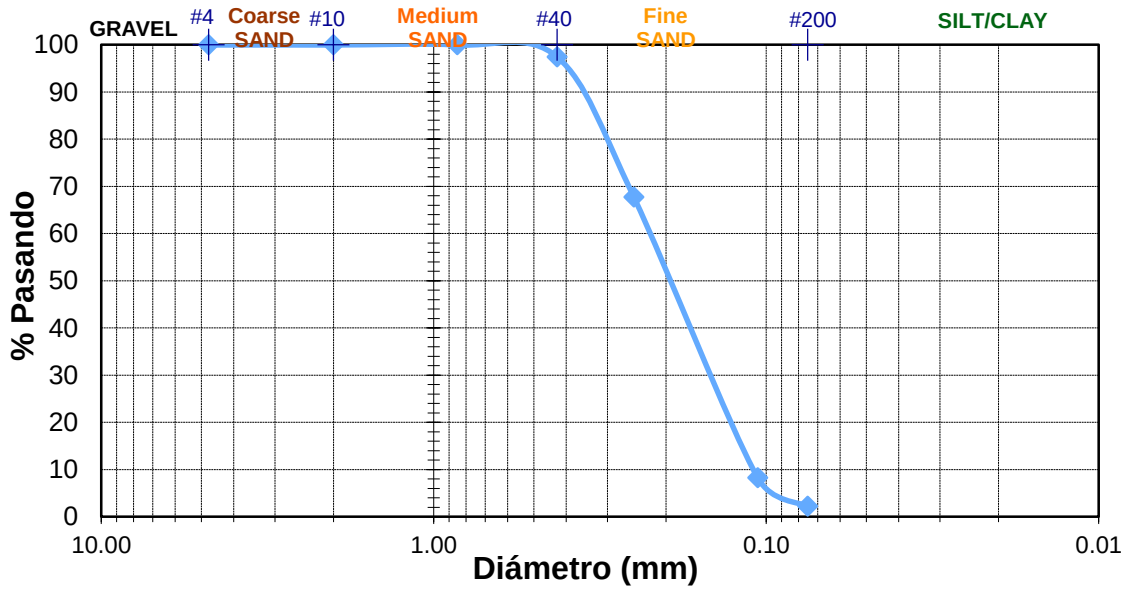
MUESTRA N° 3	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con mala gradación.

X	Y
553042	217835

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 760,1

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	0,0	0,0	100,0
10	2.00	0,0	0,0	100,0
20	0.85	0,0	0,0	100,0
40	0.43	19,5	2,6	97,4
60	0.25	225,8	29,7	67,8
140	0.11	452,4	59,5	8,3
200	0.075	45,8	6,0	2,3
Pan		16,2	2,1	0,1
Total		759,7	99,9	



D_{10}:	0,1198	C_u:	4,341
D_{30}:	0,2798	C_c:	1,258
D_{60}:	0,5199		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
Fecha de toma de muestra: 22 de abril del 2014.

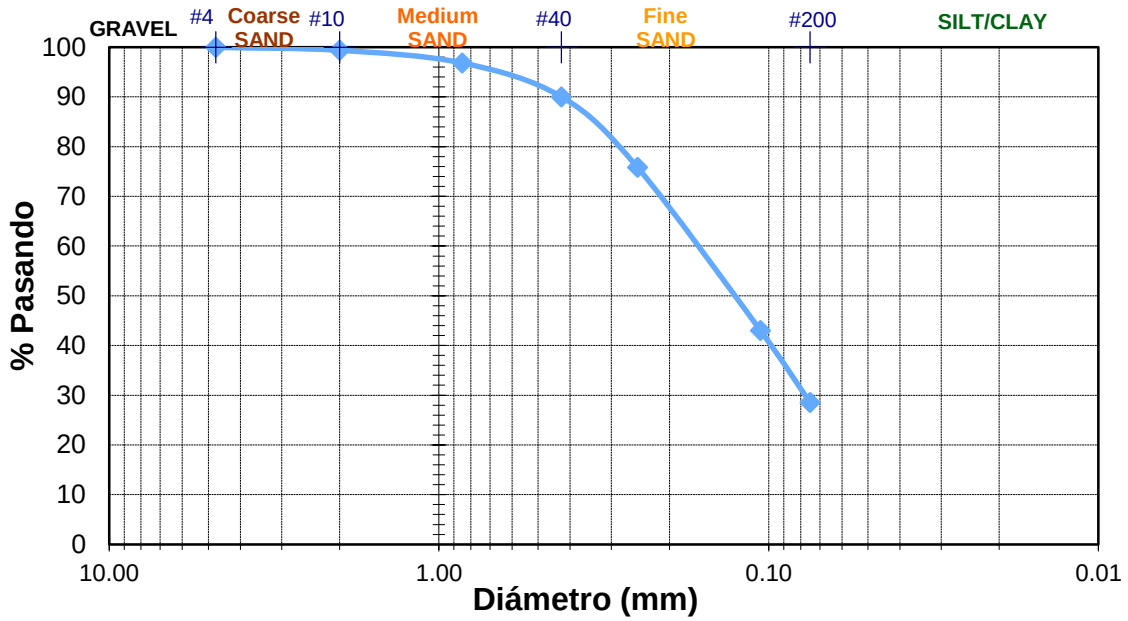
MUESTRA N° 4	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa con mala gradación

X	Y
553042	217835

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 667,3 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	0,0	0,0	100,0
10	2.00	4,0	0,6	99,4
20	0.85	16,9	2,5	96,9
40	0.43	45,5	6,8	90,0
60	0.25	94,7	14,2	75,9
140	0.11	219,1	32,8	43,0
200	0.075	96,5	14,5	28,6
Pan		186,6	28,0	0,6
Total		663,3	99,4	



D_{10}:	0,0252	C_u:	13,463
D_{30}:	0,0774	C_c:	0,703
D_{60}:	0,339		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
Fecha de toma de muestra: 22 de abril del 2014.

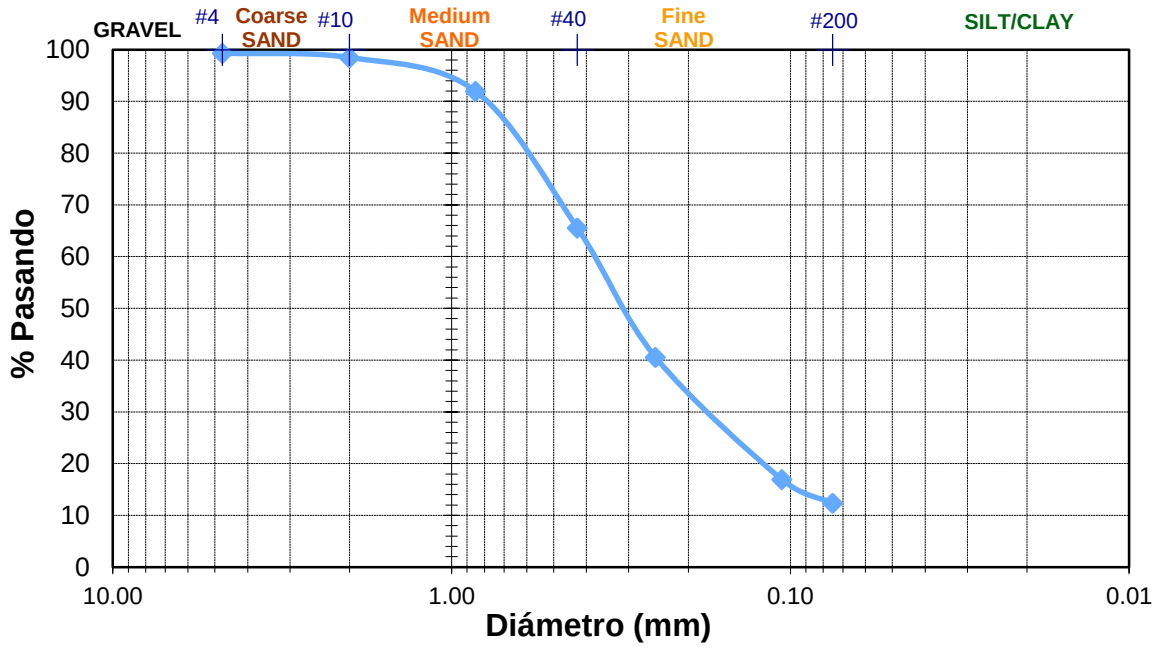
MUESTRA N° 5	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM Arena con limos, con buena gradación.

X	Y
552912	217831

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 601,8 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	4,2	0,7	99,3
10	2.00	5,1	0,8	98,5
20	0.85	39,1	6,5	92,0
40	0.43	159,2	26,5	65,5
60	0.25	150,1	24,9	40,6
140	0.11	142,1	23,6	16,9
200	0.075	27,6	4,6	12,4
Pan		72,8		
Total		600,2	99,7	



D_{10}:	0,0595	C_u:	8,855
D_{30}:	0,2337	C_c:	1,74
D_{60}:	0,5273		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
Fecha de toma de muestra: 22 de abril del 2014

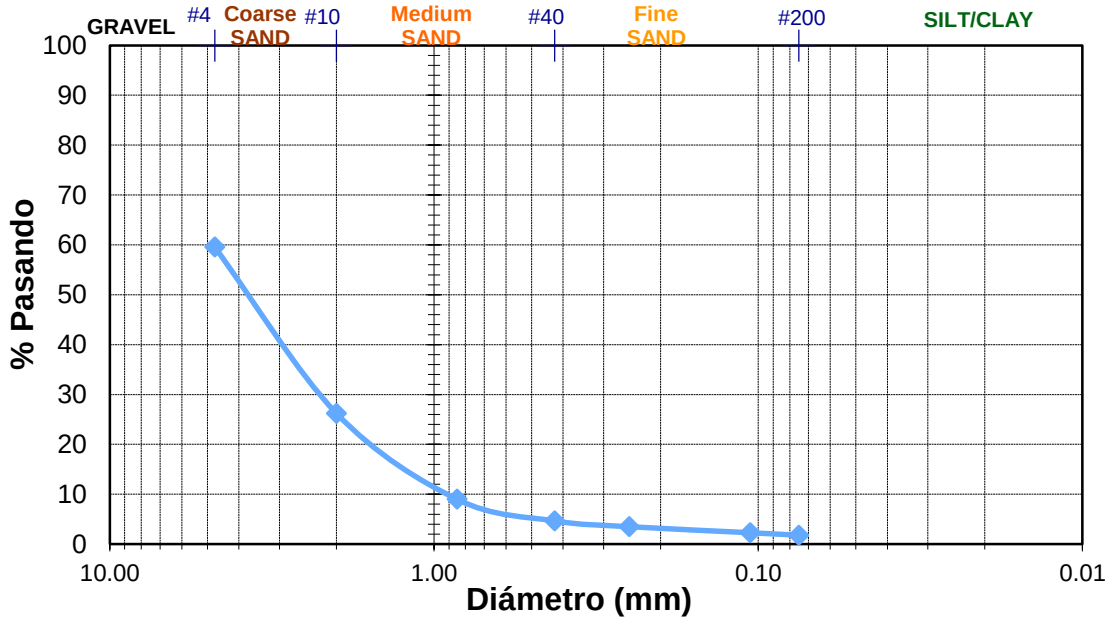
MUESTRA N° 6	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con gravas, con mala gradación.

X	Y
552528	217878

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 759,9 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	307,0	40,4	59,6
10	2.00	253,4	33,3	26,3
20	0.85	130,9	17,2	9,0
40	0.43	33,0	4,3	4,7
60	0.25	8,8	1,2	3,5
140	0.11	9,2	1,2	2,3
200	0.075	3,9	0,5	1,8
Pan		13,4	1,8	0,0
Total		759,6	100,0	



D_{10}:	0,9055	C_u:	5,309
D_{30}:	2,3101	C_c:	1,226
D_{60}:	4,8071		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
Fecha de toma de muestra: 22 de abril del 2014

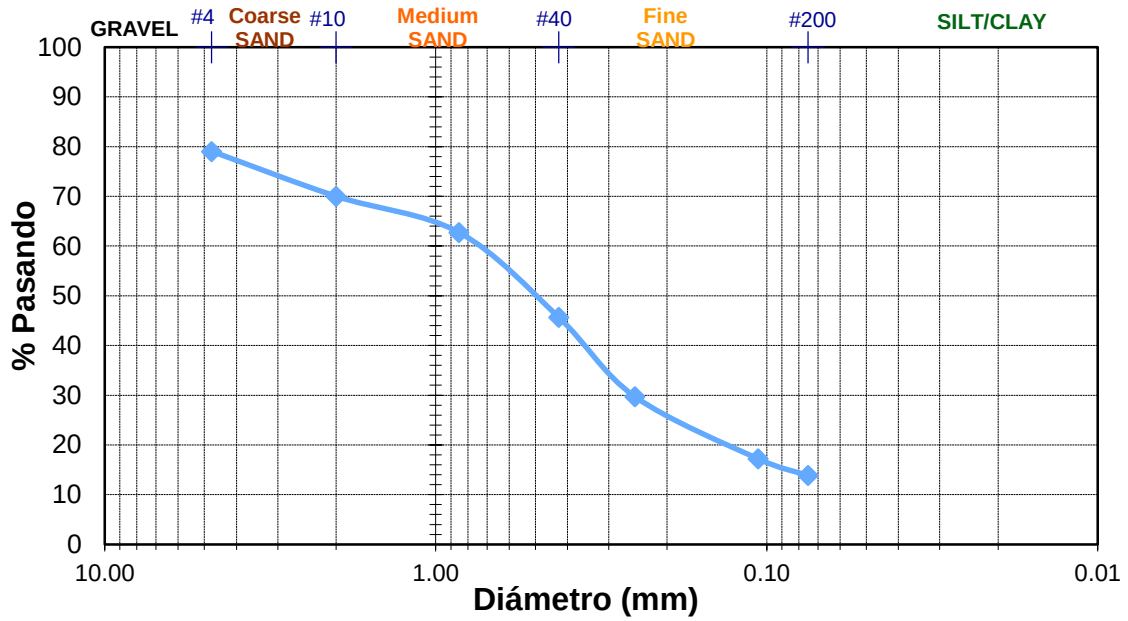
MUESTRA N° 7	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa con gravas, con buena gradación.

X	Y
552530	217879

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 752,2 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	157,7	21,0	79,0
10	2.00	67,9	9,0	70,0
20	0.85	54,7	7,3	62,7
40	0.43	128,2	17,0	45,7
60	0.25	120,2	16,0	29,7
140	0.11	94,1	12,5	17,2
200	0.075	25,2	3,4	13,9
Pan		103,3	13,7	0,1
Total		751,3	99,9	



D_{10}:	0,0532	C_u:	14,949
D_{30}:	0,3123	C_c:	2,302
D_{60}:	0,7959		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
22 de abril del 2014.

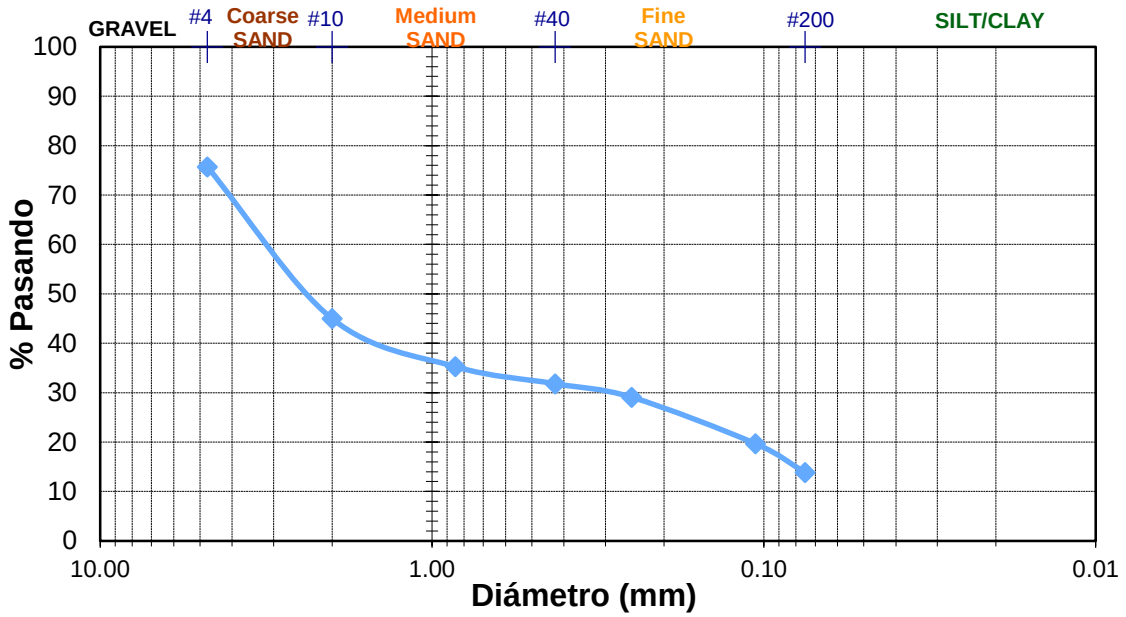
MUESTRA N° 8	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa con gravas, con buena gradación.

X	Y
552746	217919

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 744,3 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	180,7	24,3	75,7
10	2.00	228,7	30,7	45,0
20	0.85	72,5	9,7	35,3
40	0.43	25,7	3,5	31,8
60	0.25	20,3	2,7	29,1
140	0.11	69,9	9,4	19,7
200	0.075	43,7	5,9	13,8
Pan		102,4	13,8	0,1
Total		743,9	99,9	



D_{10}:	0,0535	C_u:	62,577
D_{30}:	0,5923	C_c:	1,959
D_{60}:	3,3478		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
22 de abril del 2014.

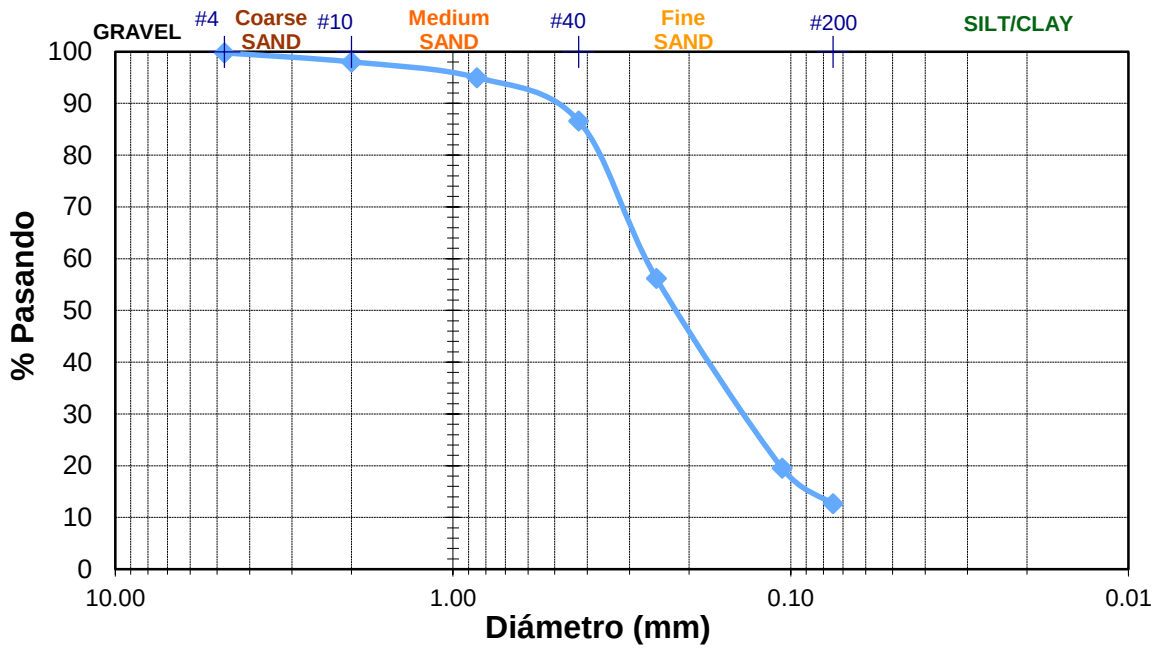
MUESTRA N° 9	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa, con buena gradación.

X	Y
552983	217969

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 703.5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	1,7	0,2	99,8
10	2.00	12,2	1,7	98,0
20	0.85	21,3	3,0	95,0
40	0.43	58,9	8,4	86,6
60	0.25	214,0	30,4	56,2
140	0.11	257,9	36,7	19,5
200	0.075	48,3	6,9	12,7
Pan		88,6	12,6	0,1
Total		702,9	99,9	



D_{10}:	0,0583	C_u:	8,575
D_{30}:	0,2077	C_c:	1,482
D_{60}:	0,4996		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
22 de abril del 2014.

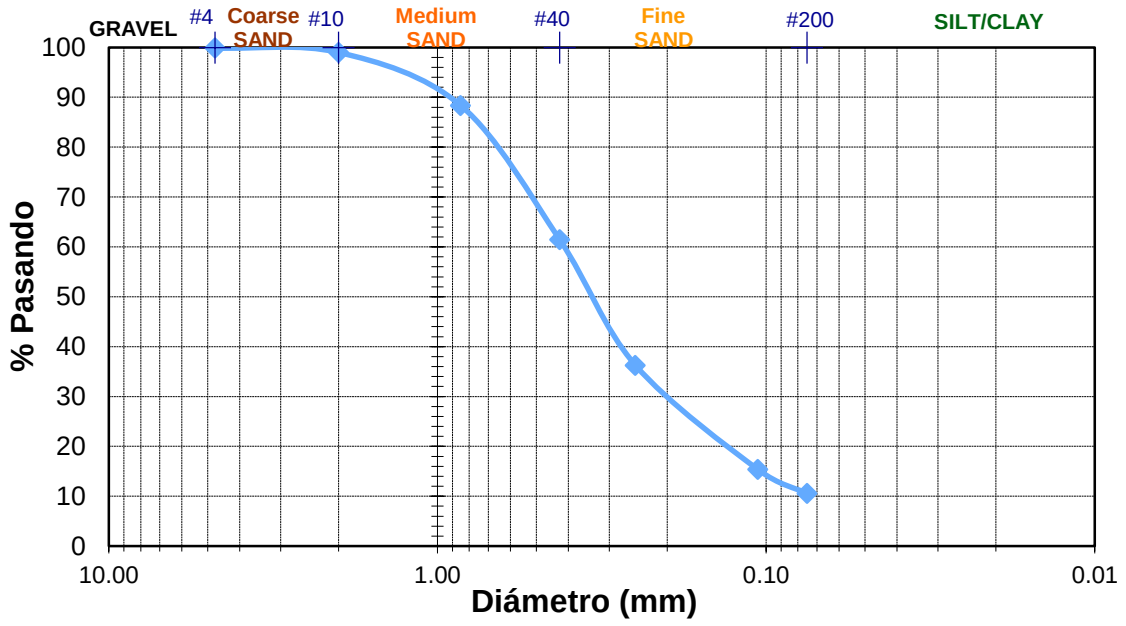
MUESTRA N° 10	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arena con limos, con buena gradación.

X	Y
553230	217971

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 742,3 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	0,8	0,1	99,9
10	2.00	6,6	0,9	99,0
20	0.85	79,0	10,6	88,4
40	0.43	199,6	26,9	61,5
60	0.25	186,9	25,2	36,3
140	0.11	155,2	20,9	15,4
200	0.075	35,7	4,8	10,6
Pan		77,9	10,5	0,1
Total		741,7	99,9	



D_{10}:	0,0699	C_u:	7,931
D_{30}:	0,253	C_c:	1,65
D_{60}:	0,5547		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
22 de abril del 2014.

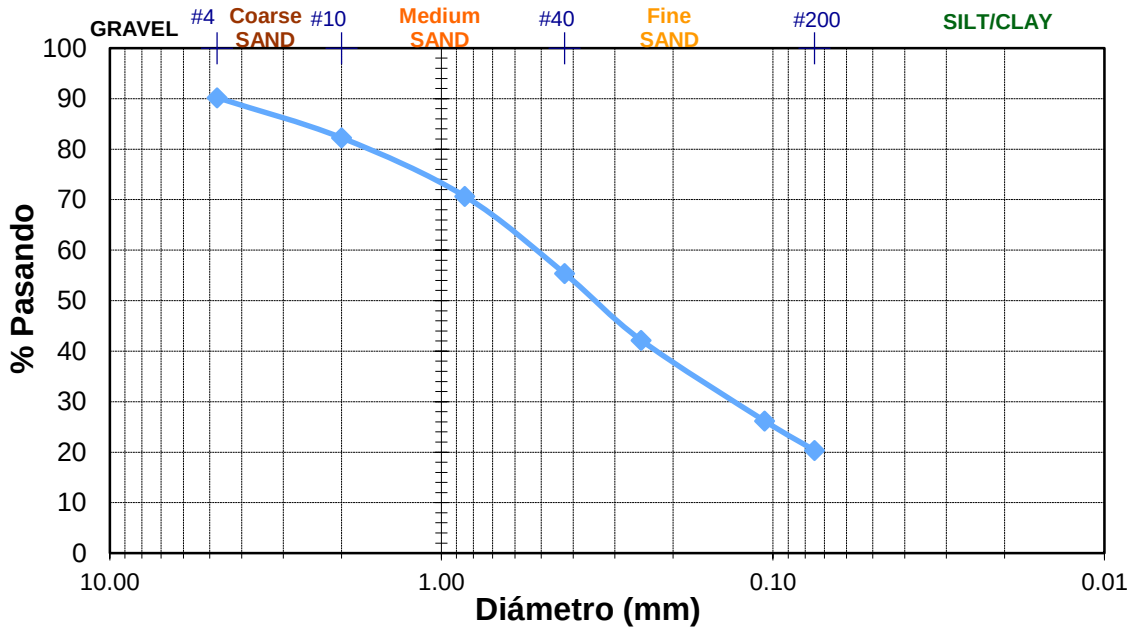
MUESTRA N° 11	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa con buena gradación.

X	Y
552452	217819

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 759,2 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	74,4	9,8	90,2
10	2.00	60,4	8,0	82,2
20	0.85	87,9	11,6	70,7
40	0.43	116,1	15,3	55,4
60	0.25	100,2	13,2	42,2
140	0.11	121,5	16,0	26,2
200	0.075	44,2	5,8	20,4
Pan		154,1	20,3	0,1
Total		758,8	99,9	



D_{10}:	0,0363	C_u:	18,311
D_{30}:	0,1691	C_c:	1,188
D_{60}:	0,664		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

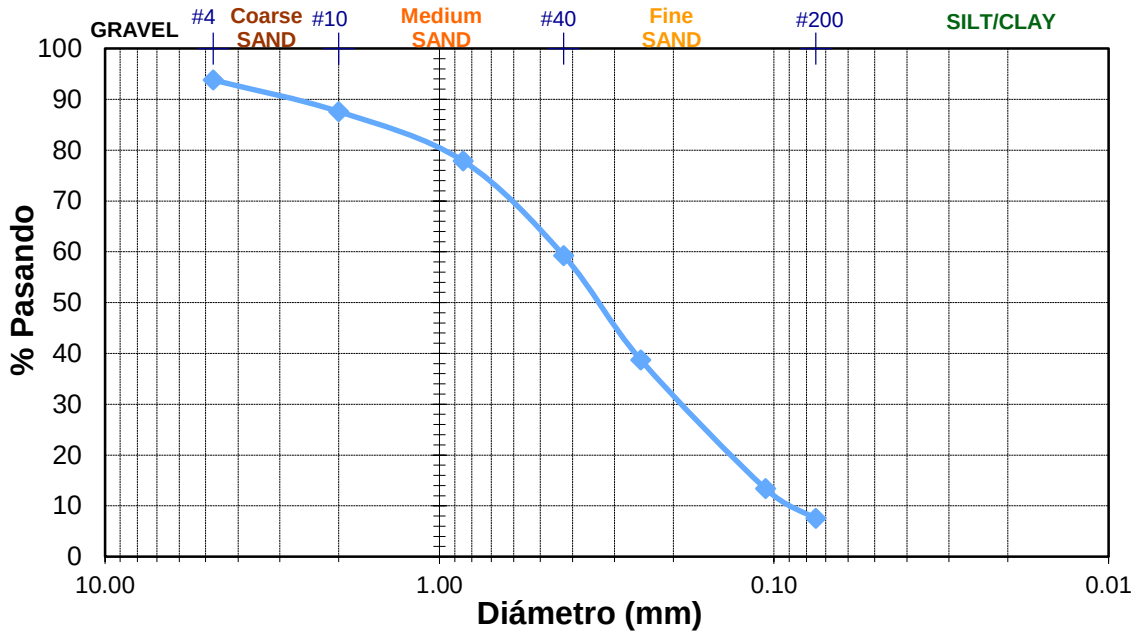
MUESTRA N° 12	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM. Arena con limos, con buena gradación.

X	Y
552566	218039

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 732,0 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	45,3	6,2	93,8
10	2.00	45,5	6,2	87,6
20	0.85	71,0	9,7	77,9
40	0.43	136,3	18,6	59,3
60	0.25	150,2	20,5	38,8
140	0.11	185,5	25,3	13,4
200	0.075	42,9	5,9	7,6
Pan		54,8	7,5	0,1
Total		731,5	99,9	



D_{10}:	0,0874	C_u:	7,284
D_{30}:	0,2948	C_c:	1,563
D_{60}:	0,6363		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

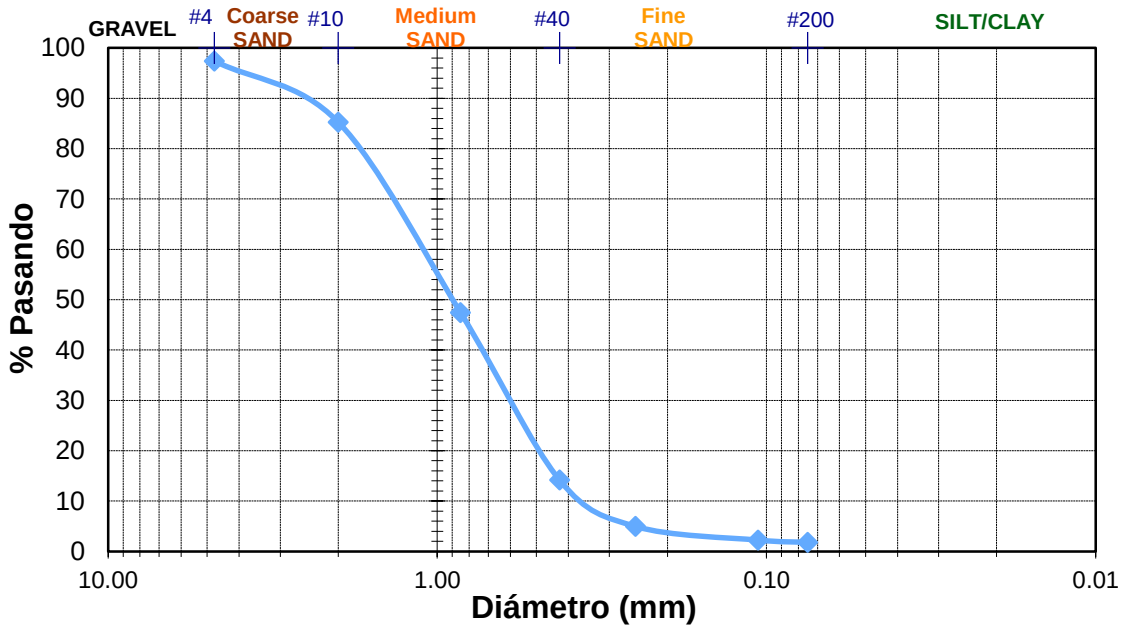
MUESTRA N° 13	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con mala gradación.

X	Y
552432	218137

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 731,8 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	19,0	2,6	97,4
10	2.00	88,7	12,1	85,3
20	0.85	276,8	37,8	47,5
40	0.43	243,5	33,3	14,2
60	0.25	67,3	9,2	5,0
140	0.11	19,9	2,7	2,3
200	0.075	3,3	0,5	1,8
Pan		12,2	1,7	0,2
Total		730,7	99,8	



D_{10}:	0,2316	C_u:	5,288
D_{30}:	0,5564	C_c:	1,092
D_{60}:	1,2246		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

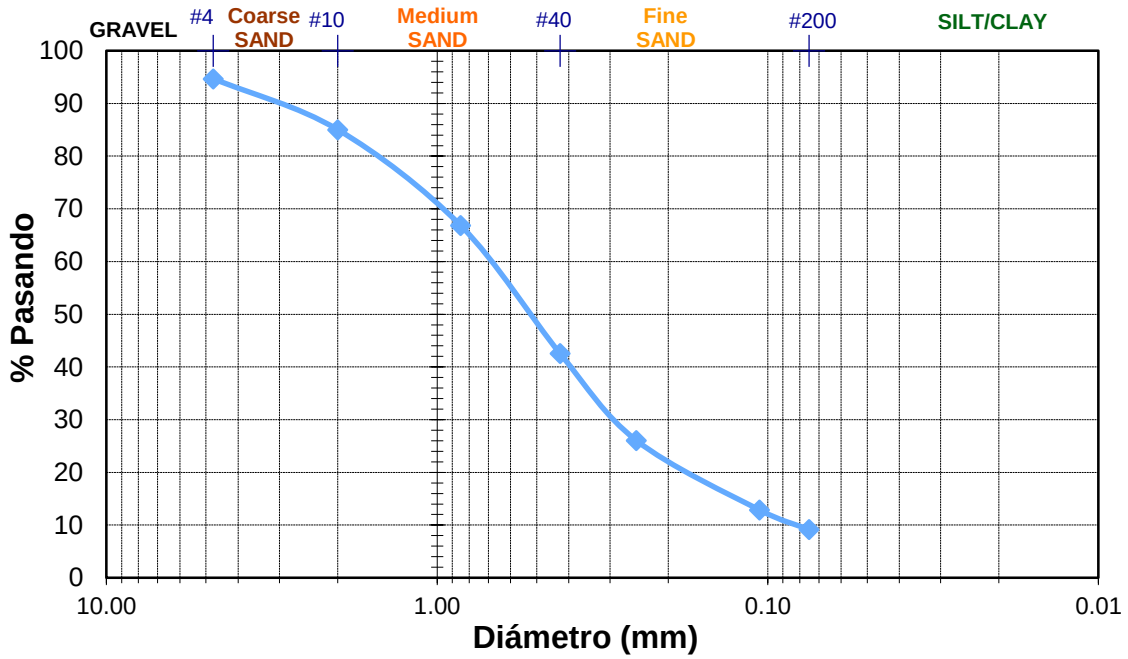
MUESTRA N° 14	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arena con limos, buena gradación.

X	Y
552666	218264

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 834 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	44,2	5,3	94,7
10	2.00	80,3	9,7	85,0
20	0.85	151,2	18,2	66,9
40	0.43	202,3	24,3	42,5
60	0.25	137,1	16,5	26,1
140	0.11	109,8	13,2	12,9
200	0.075	31,0	3,7	9,1
Pan		75,5	9,1	0,1
Total		831,4	99,9	



D_{10}:	0,0813	C_u:	9,181
D_{30}:	0,3388	C_c:	1,891
D_{60}:	0,7467		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

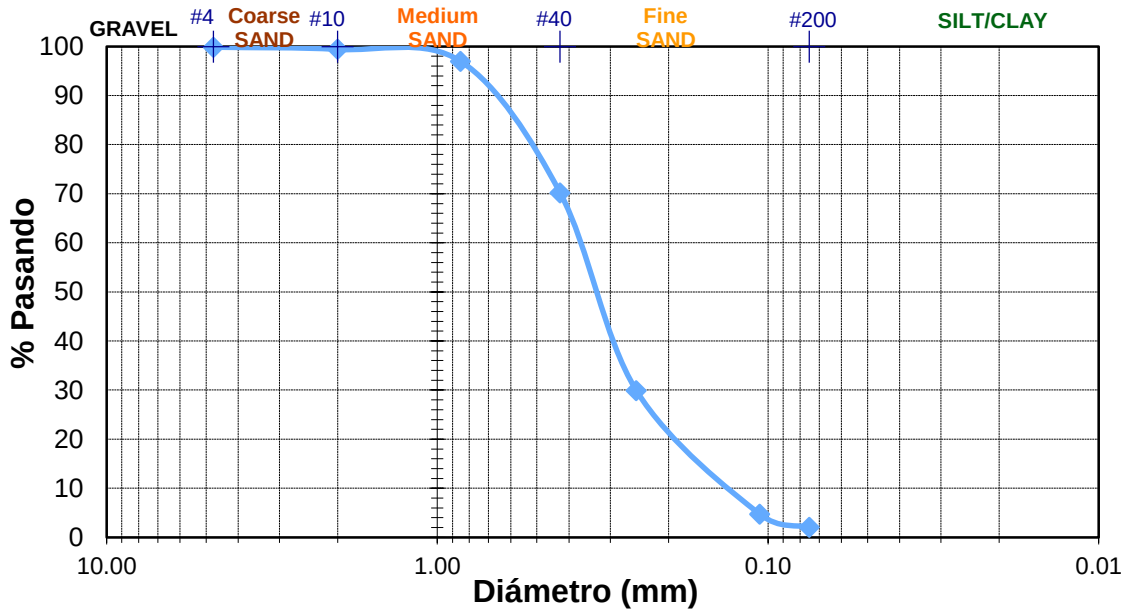
MUESTRA N° 15	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con mala gradación.

X	Y
552658	218260

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 880,9 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	1,1	0,1	99,9
10	2.00	3,9	0,4	99,4
20	0.85	21,5	2,4	97,0
40	0.43	236,2	26,8	70,2
60	0.25	354,8	40,3	29,9
140	0.11	221,4	25,1	4,8
200	0.075	23,6	2,7	2,1
Pan		17,9	2,0	0,1
Total		880,4	99,9	



D_{10}:	0,1476	C_u:	3,695
D_{30}:	0,3068	C_c:	1,169
D_{60}:	0,5456		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

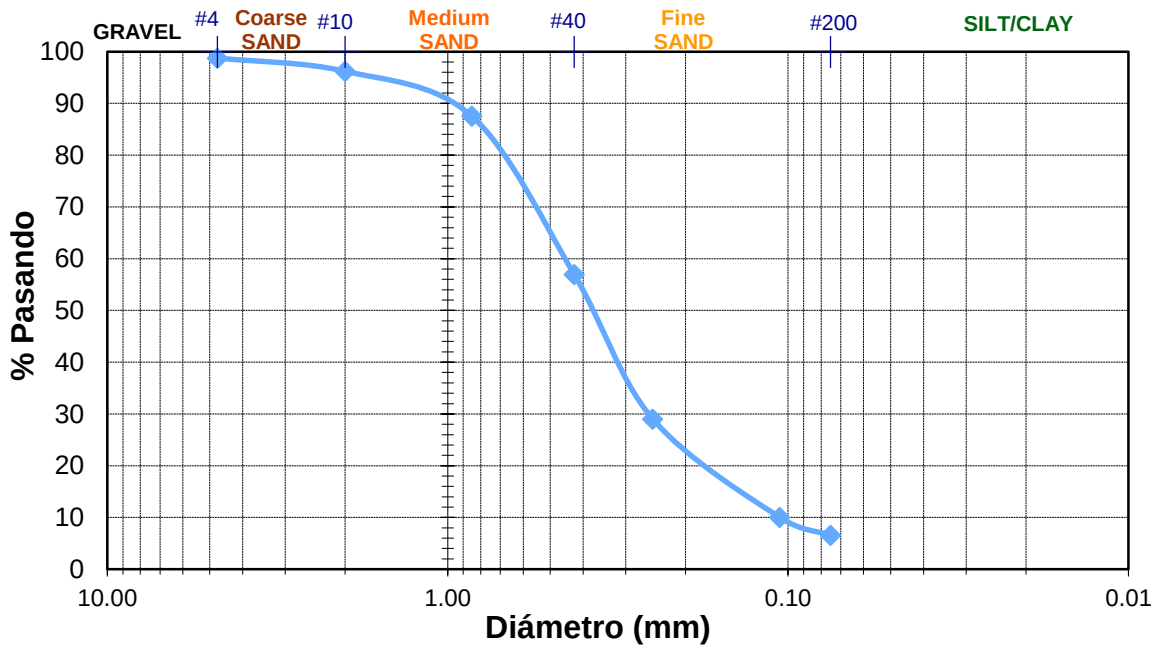
MUESTRA N° 16	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP-SM Arena con limos, con mala gradación.

X	Y
552513	218303

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 768,1 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	9,5	1,2	98,8
10	2.00	19,7	2,6	96,2
20	0.85	66,5	8,7	87,5
40	0.43	234,9	30,6	57,0
60	0.25	214,5	27,9	29,0
140	0.11	145,9	19,0	10,0
200	0.075	26,6	3,5	6,6
Pan		49,6	6,5	0,1
Total		767,2	99,9	



D_{10}:	0,1057	C_u:	5,482
D_{30}:	0,2951	C_c:	1,423
D_{60}:	0,5792		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

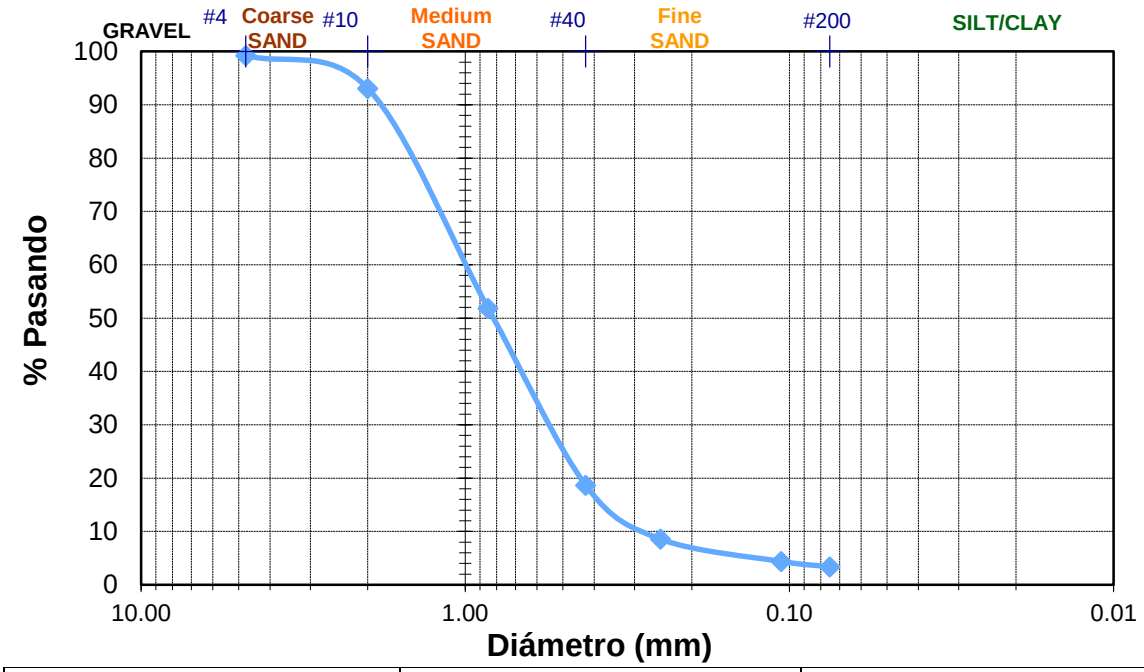
MUESTRA N° 17	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con mala gradación.

X	Y
552520	218250

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 840,7 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	6,3	0,7	99,3
10	2.00	51,8	6,2	93,1
20	0.85	346,8	41,3	51,8
40	0.43	278,9	33,2	18,7
60	0.25	84,8	10,1	8,6
140	0.11	35,3	4,2	4,4
200	0.075	8,3	1,0	3,4
Pan		27,1	3,2	0,2
Total		839,3	99,8	



D_{10}:	0,193	C_u:	5,543
D_{30}:	0,5023	C_c:	1,222
D_{60}:	1,0695		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

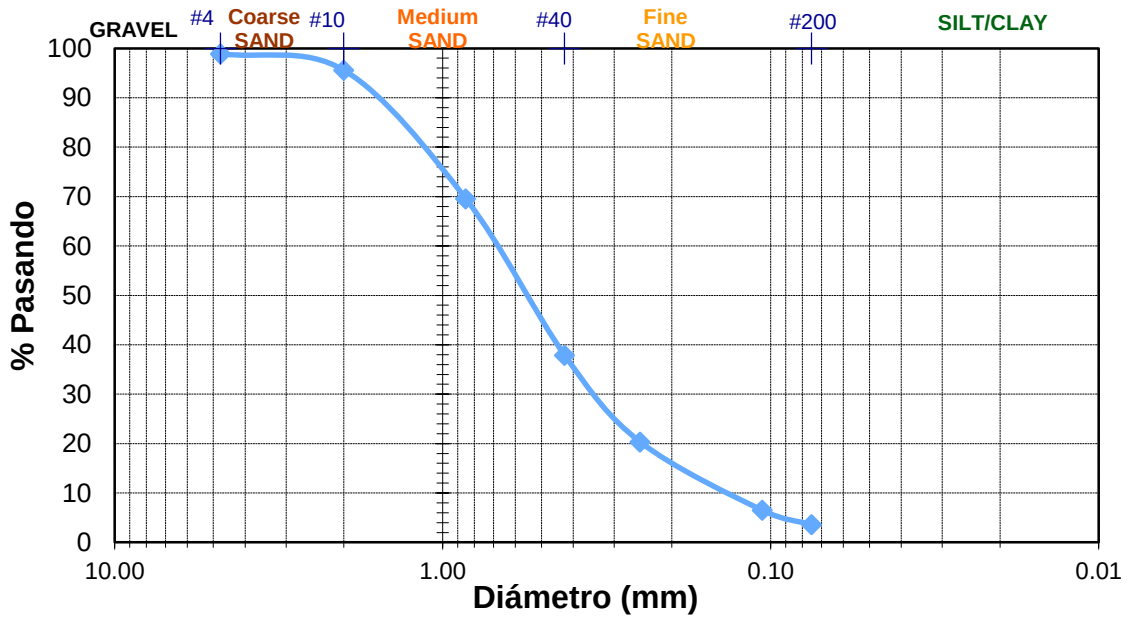
MUESTRA N° 18	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con mala gradación.

X	Y
552446	218422

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 738,0 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	8,1	1,1	98,9
10	2.00	24,7	3,3	95,6
20	0.85	192,0	26,0	69,5
40	0.43	233,6	31,7	37,9
60	0.25	129,7	17,6	20,3
140	0.11	102,1	13,8	6,5
200	0.075	21,1	2,9	3,6
Pan		26,0	3,5	0,1
Total		737,3	99,9	



D_{10}:	0,147	C_u:	4,959
D_{30}:	0,3798	C_c:	1,346
D_{60}:	0,729		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

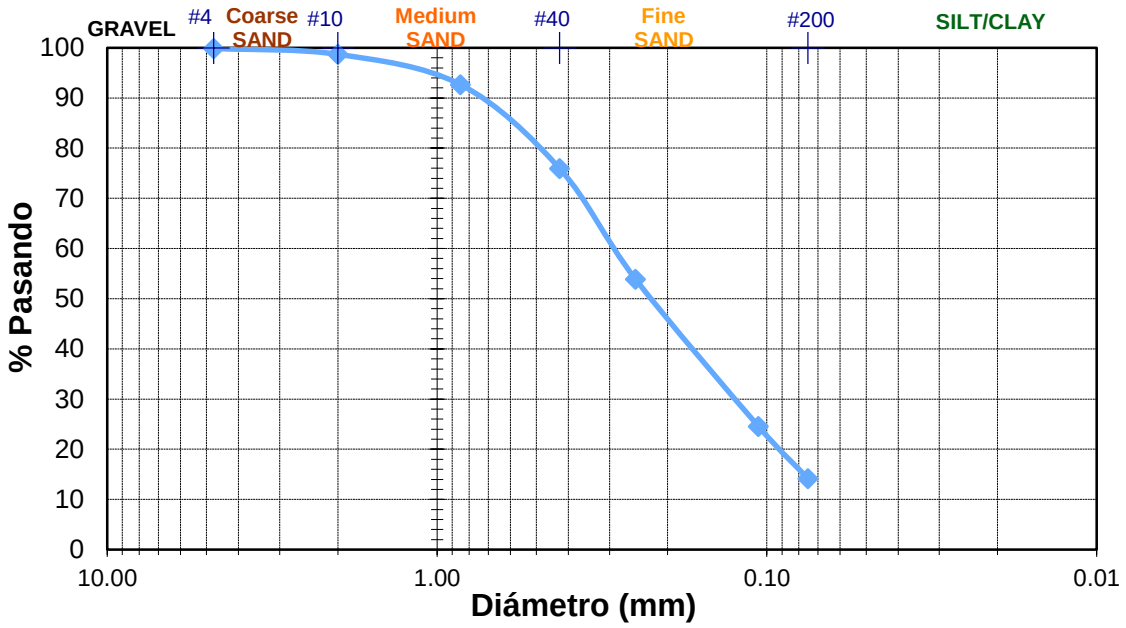
MUESTRA N° 19	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa, con buena gradación.

X	Y
552398	218606

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 890,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	1,1	0,1	99,9
10	2.00	10,5	1,2	98,7
20	0.85	53,6	6,0	92,7
40	0.43	149,1	16,7	75,9
60	0.25	196,6	22,1	53,9
140	0.11	261,0	29,3	24,5
200	0.075	92,5	10,4	14,2
Pan		125,2	14,1	0,1
Total		889,6	99,9	



D_{10}:	0,0521	C_u:	9,365
D_{30}:	0,1647	C_c:	1,067
D_{60}:	0,4879		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

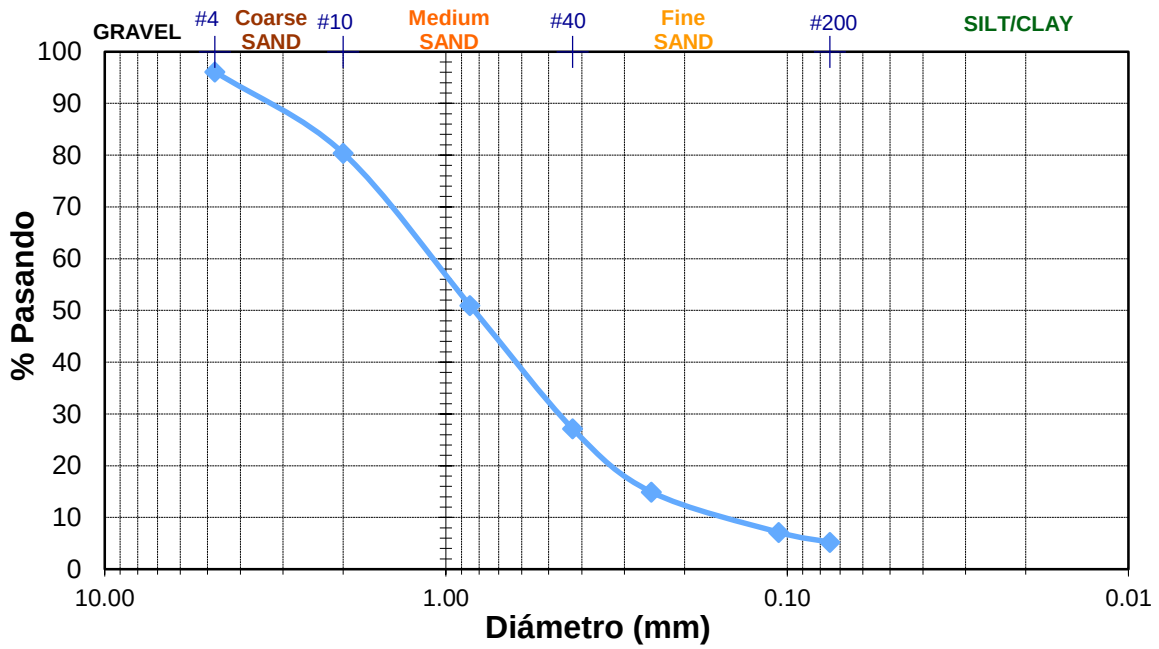
MUESTRA N° 20	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM. Arena con limos, con buena gradación.

X	Y
552390	218256

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 724 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	28,2	3,9	96,1
10	2.00	113,7	15,7	80,4
20	0.85	213,0	29,4	51,0
40	0.43	172,6	23,8	27,1
60	0.25	88,4	12,2	14,9
140	0.11	56,3	7,8	7,1
200	0.075	13,9	1,9	5,2
Pan		36,4	5,0	0,2
Total		722,5	99,8	



D_{10}:	0,1541	C_u:	7,763
D_{30}:	0,4889	C_c:	1,297
D_{60}:	1,1961		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO
10 de setiembre del 2014.

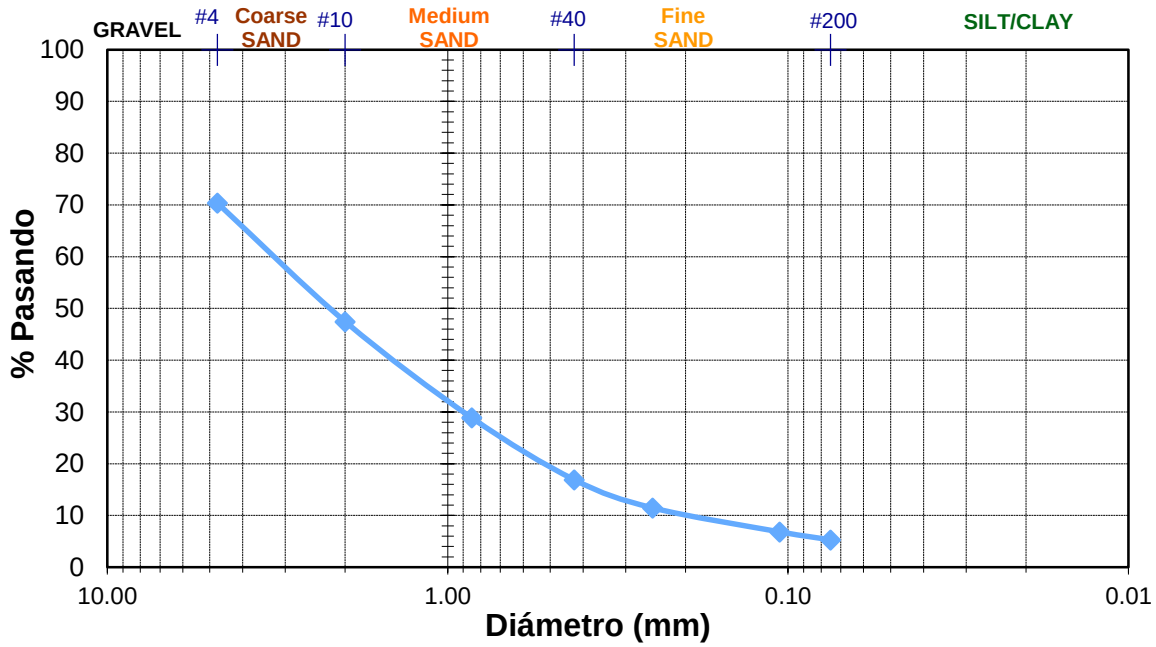
MUESTRA N° 21	**UBICACIÓN:** Cráter Playa Hermosa, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arena con limos y gravas, con buena gradación.

X	Y
552430	218003

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 741,7 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	219,7	29,6	70,4
10	2.00	170,1	22,9	47,4
20	0.85	137,9	18,6	28,9
40	0.43	88,7	12,0	16,9
60	0.25	40,4	5,4	11,4
140	0.11	34,3	4,6	6,8
200	0.075	11,5	1,6	5,3
Pan		38,2	5,2	0,1
Total		740,8	99,9	



D_{10}:	0,2119	C_u:	16,571
D_{30}:	0,9116	C_c:	1,117
D_{60}:	3,5109		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

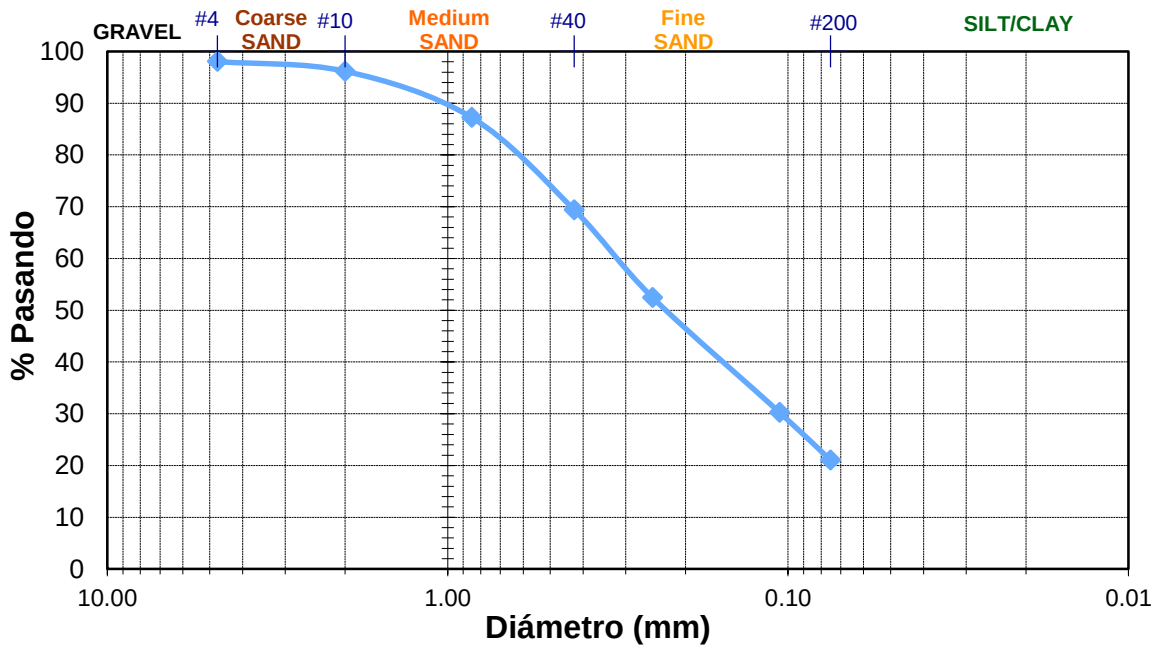
MUESTRA N° 22	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa, con mala gradación.

X	Y
553098	218635

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 734,3 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	14,2	1,9	98,1
10	2.00	13,8	1,9	96,2
20	0.85	65,5	8,9	87,3
40	0.43	131,1	17,9	69,4
60	0.25	124,6	17,0	52,4
140	0.11	162,8	22,2	30,3
200	0.075	68,0	9,3	21,0
Pan		153,4	20,9	0,1
Total		733,4	99,9	



D_{10}:	0,035	C_u:	13,971		
D_{30}:	0,1051	C_c:	0,645		
D_{60}:	0,4888				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

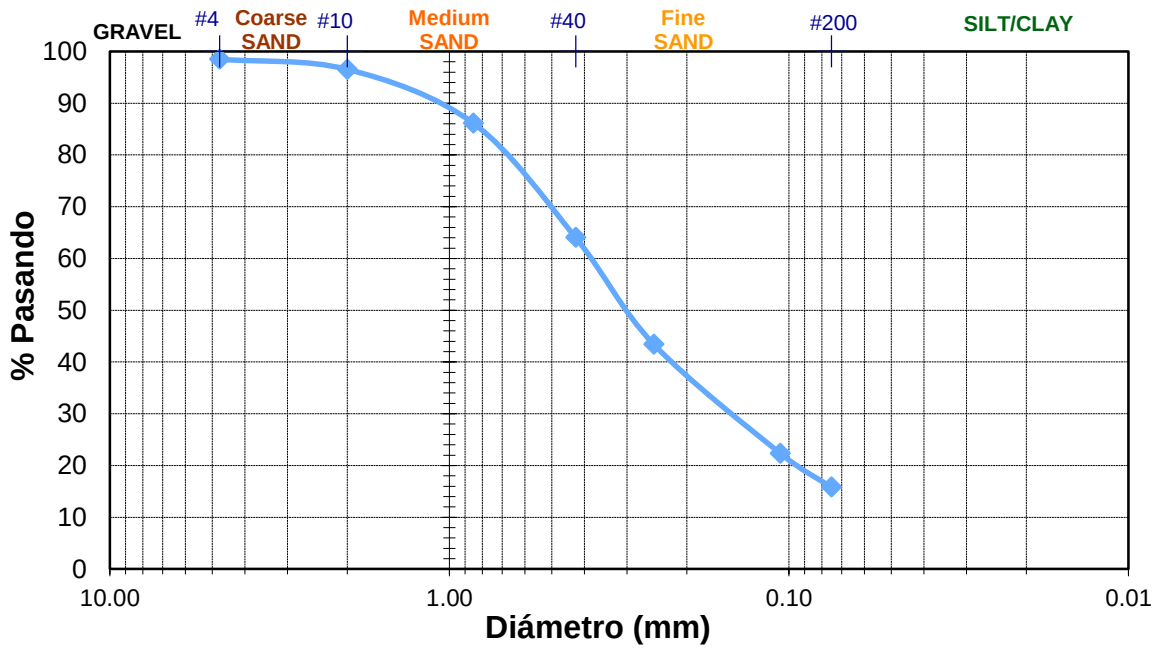
MUESTRA N° 23	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa, con buena gradación.

X	Y
552971	218747

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 715,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	10,7	1,5	98,5
10	2.00	14,0	2,0	96,5
20	0.85	74,6	10,4	86,1
40	0.43	157,9	22,1	64,1
60	0.25	147,7	20,6	43,4
140	0.11	150,6	21,0	22,4
200	0.075	46,7	6,5	15,8
Pan		112,7	15,8	0,1
Total		714,9	99,9	



D_{10}:	0,0466	C_u:	11,576		
D_{30}:	0,1939	C_c:	1,497		
D_{60}:	0,5393				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

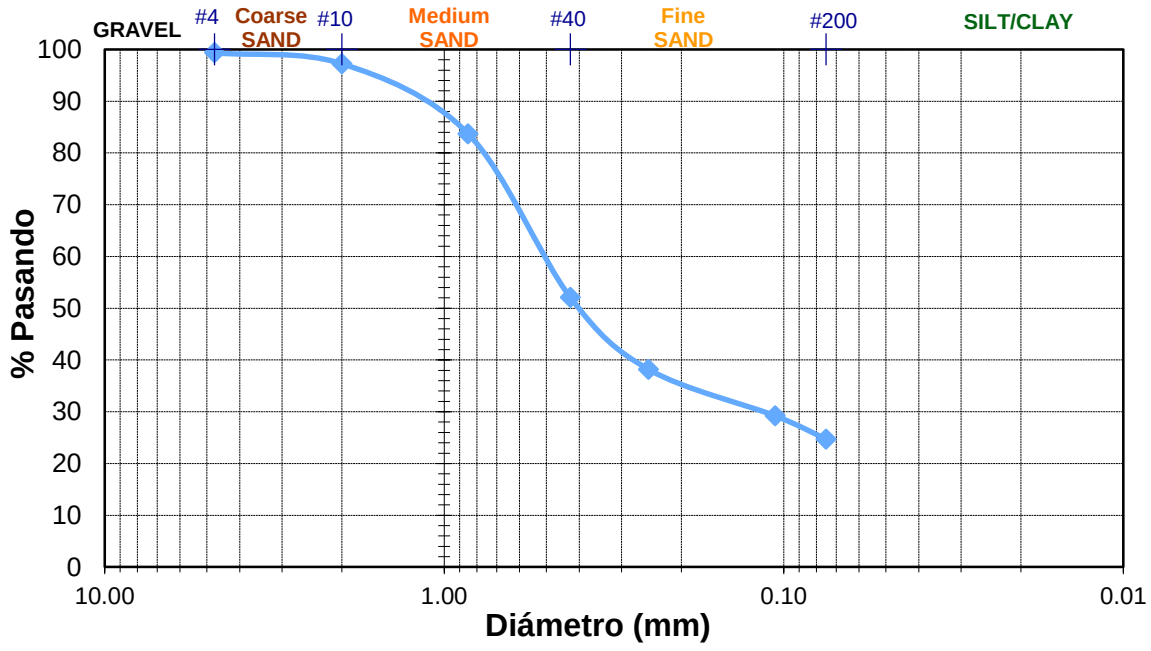
MUESTRA N° 24	**UBICACIÓN:** Cráter Diego de la Haya, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SC. Arena arcillosa, con mala gradación.

X	Y
553244	218346

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 792 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	5,1	0,6	99,4
10	2.00	16,8	2,1	97,2
20	0.85	107,2	13,5	83,7
40	0.43	250,4	31,6	52,1
60	0.25	110,3	13,9	38,2
140	0.11	71,0	9,0	29,2
200	0.075	35,6	4,5	24,7
Pan		193,7	24,5	0,2
Total		790,1	99,8	



D_{10}:	0,0295	C_u:	17,638		
D_{30}:	0,1169	C_c:	0,888		
D_{60}:	0,5209				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

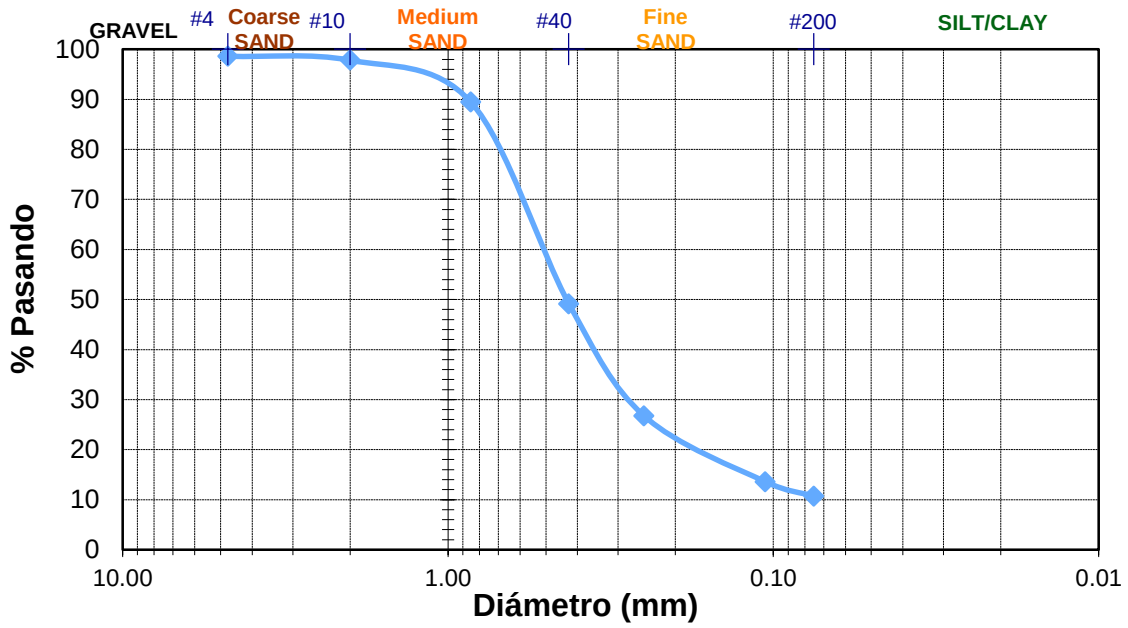
MUESTRA N° 25	**UBICACIÓN:** Cráter Diego de la Haya, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arena con limos, con buena gradación.

X	Y
553305	218329

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 802,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	10,9	1,4	98,6
10	2.00	6,5	0,8	97,8
20	0.85	67,3	8,4	89,4
40	0.43	323,5	40,3	49,1
60	0.25	179,6	22,4	26,8
140	0.11	105,7	13,2	13,6
200	0.075	23,3	2,9	10,7
Pan		84,2	10,5	0,2
Total		801	99,8	



D_{10}:	0,0692	C_u:	8,021
D_{30}:	0,2648	C_c:	1,826
D_{60}:	0,5551		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

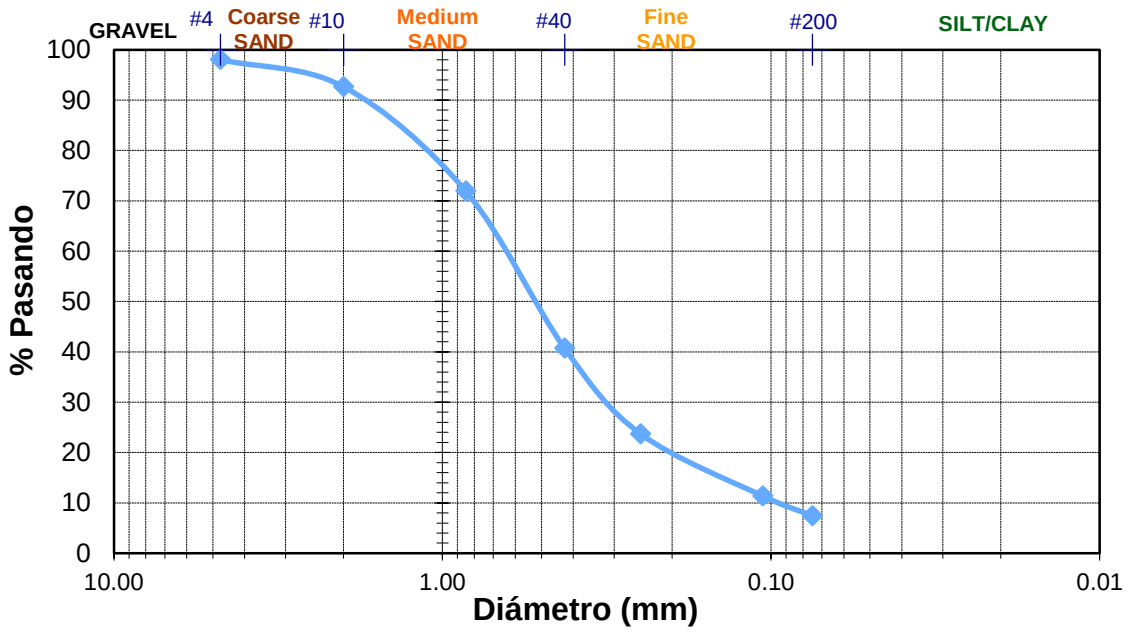
MUESTRA N° 26	**UBICACIÓN:** Cráter Diego de la Haya, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM. Arena con limos, con buena gradación.

X	Y
553285	218279

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 752,6 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	14,6	1,9	98,1
10	2.00	40,6	5,4	92,7
20	0.85	155,8	20,7	72,0
40	0.43	235,2	31,3	40,7
60	0.25	127,8	17,0	23,7
140	0.11	93,2	12,4	11,3
200	0.075	29,3	3,9	7,5
Pan		55,4	7,4	0,1
Total		751,9	99,9	



D_{10}:	0,0949	C_u:	7,323
D_{30}:	0,3319	C_c:	1,669
D_{60}:	0,6951		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

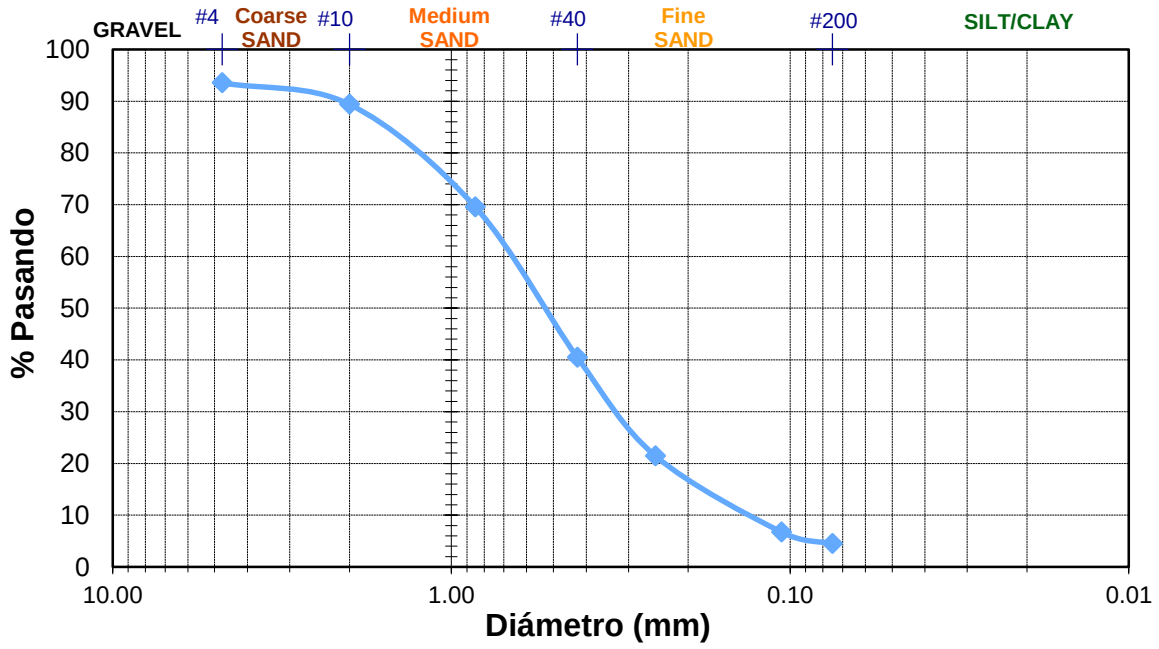
MUESTRA N° 27	**UBICACIÓN:** Cráter Diego de la Haya, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con mala gradación.

X	Y
553344	218307

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 910,4 g

Número de malla	Diámetro	Suelo retenido (g)	Suelo Retenido (%)	Suelo pasando (%)
4	4.75	58,7	6,4	93,6
10	2.00	37,7	4,1	89,4
20	0.85	180,6	19,8	69,6
40	0.43	264,6	29,1	40,5
60	0.25	173,5	19,1	21,5
140	0.11	134,1	14,7	6,7
200	0.075	20,3	2,2	4,5
Pan		40,2	4,4	0,1
Total		909,7	99,9	



D_{10}:	0,1443	C_u:	5,047
D_{30}:	0,3778	C_c:	1,359
D_{60}:	0,7282		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

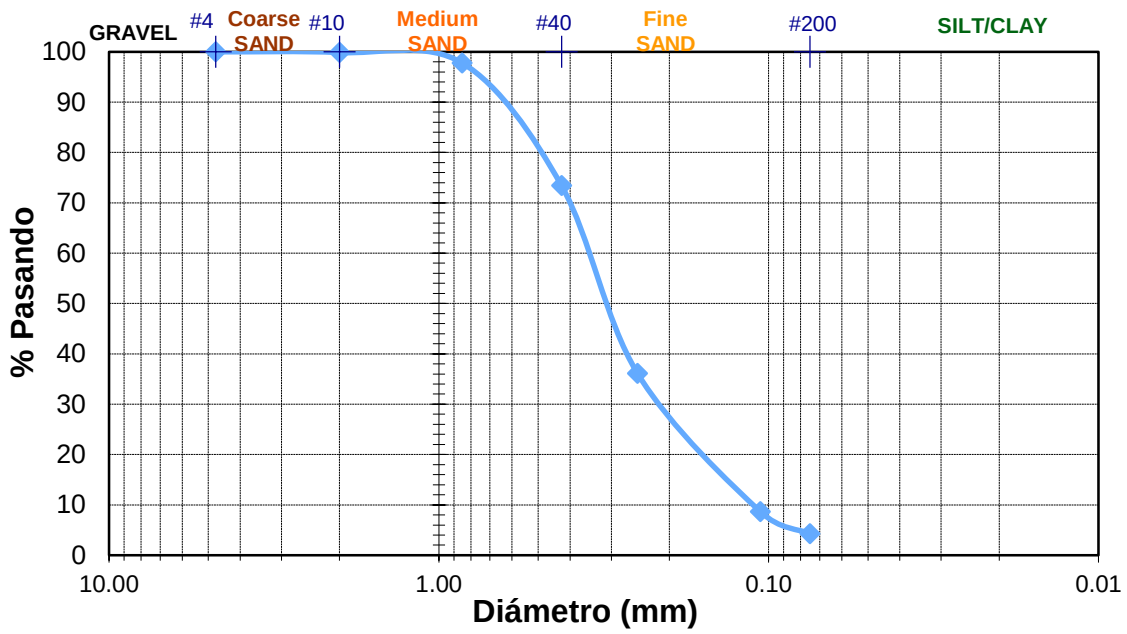
MUESTRA N° 28	**UBICACIÓN:** Cráter Diego de la Haya, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con mala gradación.

X	Y
553382	218264

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 706,2 g

Número de malla	Diámetro	Suelo retenido (g)	Suelo Retenido (%)	Suelo pasando (%)
4	4.75	0,0	0,0	100,0
10	2.00	1,0	0,1	99,9
20	0.85	14,7	2,1	97,8
40	0.43	172,0	24,4	73,4
60	0.25	263,6	37,3	36,1
140	0.11	194,0	27,5	8,6
200	0.075	30,7	4,3	4,3
Pan		29,1	4,1	0,2
Total		705,1	99,8	



D_{10}:	0,1173	C_u:	4,508
D_{30}:	0,282	C_c:	1,281
D_{60}:	0,529		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

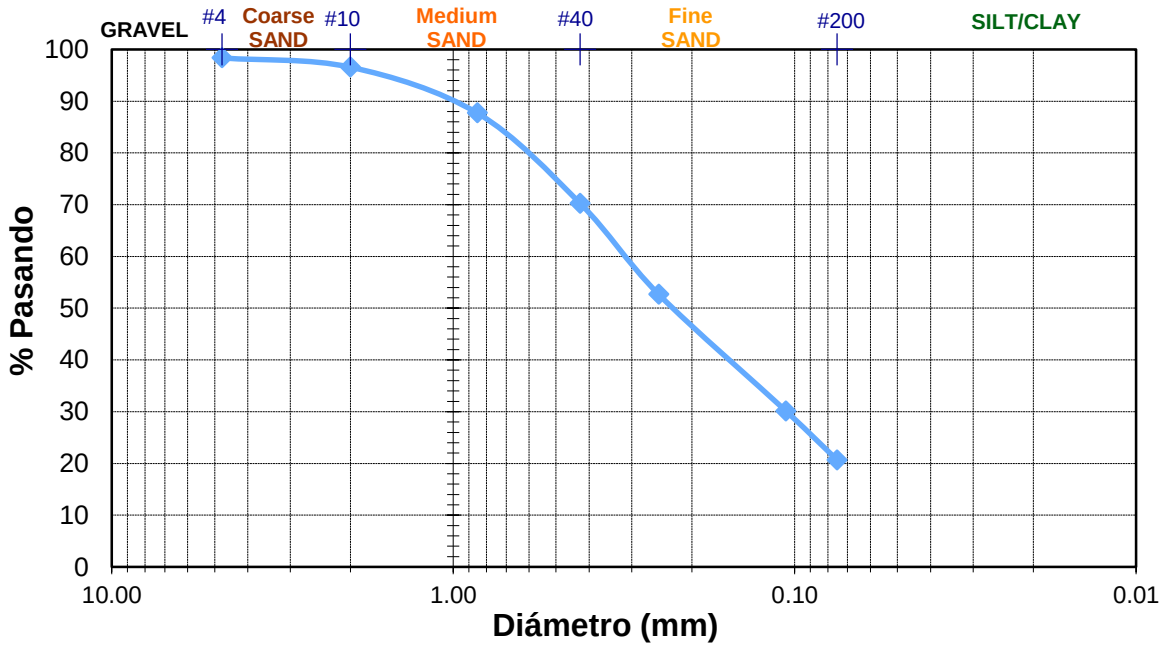
MUESTRA N° 29	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa, con mala gradación.

X	Y
552842	218486

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 752,6 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	12,2	1,6	98.4
10	2.00	13,5	1,8	96,6
20	0.85	66,7	8,9	87,7
40	0.43	131,4	17,5	70,3
60	0.25	132,5	17,6	52,7
140	0.11	169,6	22,5	30,1
200	0.075	71,4	9,5	20,6
Pan		153,4	20,4	0,3
Total		749,2	99,7	



D_{10}:	0,0354	C_u:	13,754		
D_{30}:	0,1056	C_c:	0,647		
D_{60}:	0,4867				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

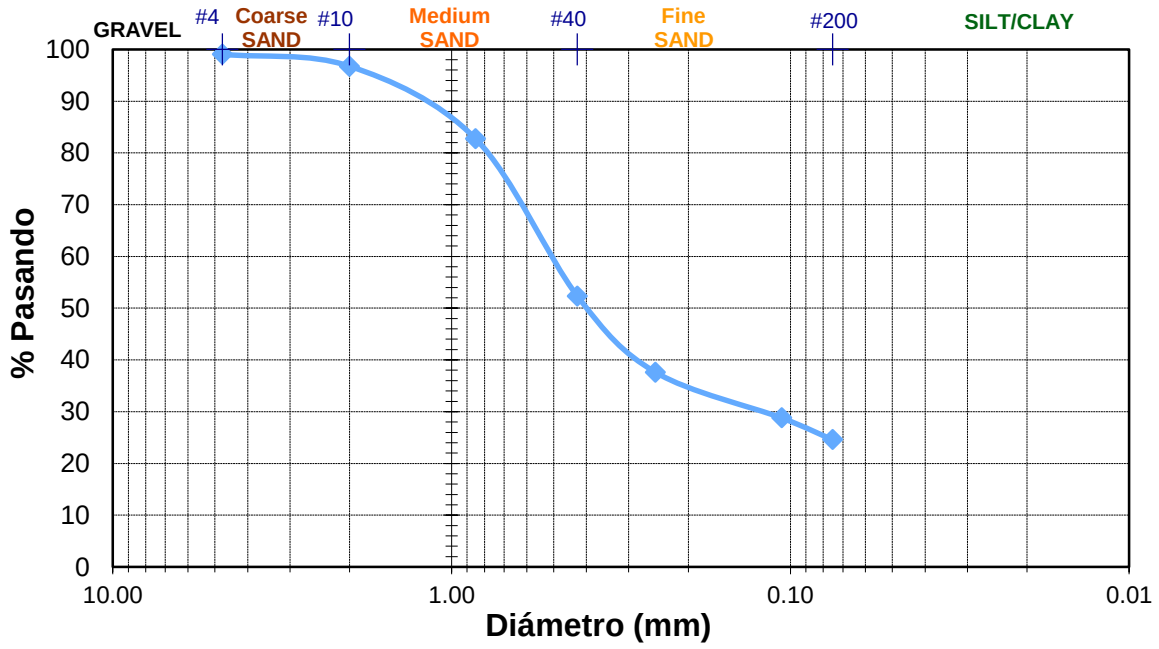
MUESTRA N° 30	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SC-SM Arena limosa arcillosa, con mala gradación,

X	Y
552929	218224

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 773,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	7,3	0,9	99,1
10	2.00	17,9	2,3	96,7
20	0.85	108,1	14,0	82,8
40	0.43	235,4	30,4	52,3
60	0.25	113,6	14,7	37,6
140	0.11	68,3	8,8	28,8
200	0.075	32,5	4,2	24,6
Pan		189,7	24,5	0,1
Total		772,8	99,9	



D_{10}:	0,0299	C_u:	17,734		
D_{30}:	0,1221	C_c:	0,940		
D_{60}:	0,5303				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

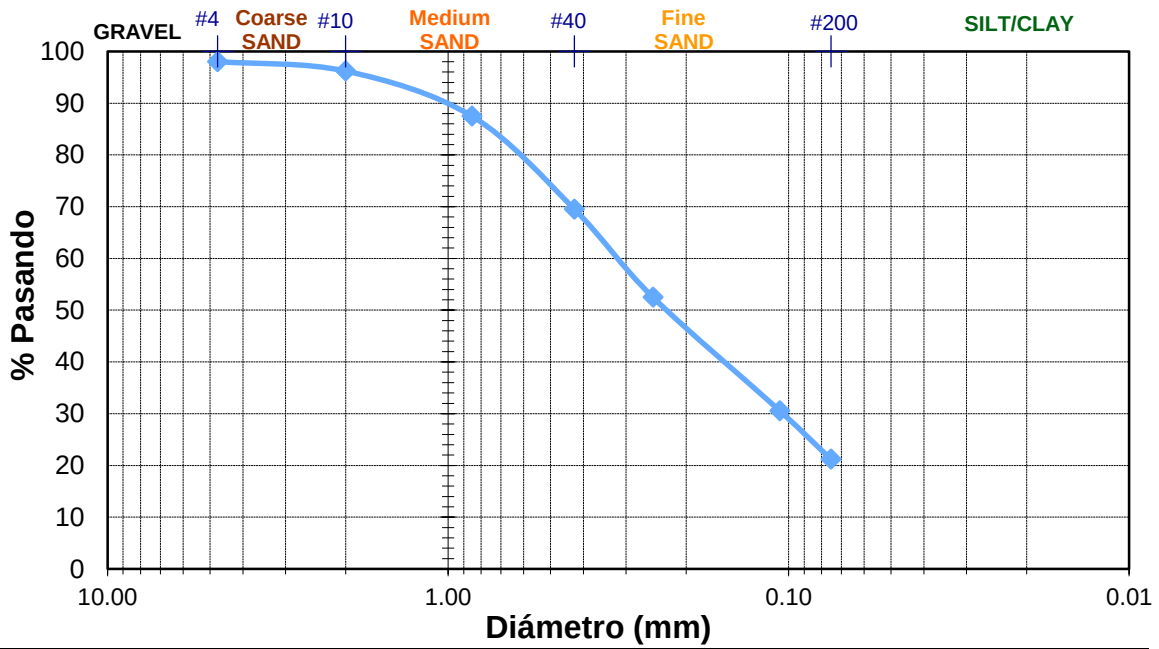
MUESTRA N° 31	**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM, Arena limosa, con mala gradación.

X	Y
552819	218568

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 703,6 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	13,8	2,0	98,0
10	2.00	12,9	1,8	96,2
20	0.85	61,4	8,7	87,5
40	0.43	126,5	18,0	69,5
60	0.25	119,6	17,0	52,5
140	0.11	154,3	21,9	30,6
200	0.075	65,9	9,4	21,2
Pan		146,9	20,9	0,3
Total		701,3	99,6	



D_{10}:	0,0343	C_u:	14,163
D_{30}:	0,1040	C_c:	0,650
D_{60}:	0,4856		

ANEXO 8: LÍMITES DE ATTERBERG VOLCÁN IRAZÚ

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO	
MUESTRA N° 24	**UBICACIÓN:** Cráter Diego de la Haya, Volcán Irazú
COORDENADAS	Plasticidad: Baja a media. Suelo: SC
X: 553244 / Y: 218346	

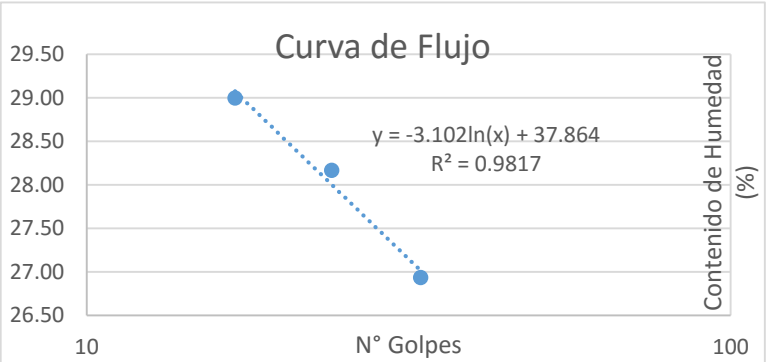
Resultados de Límites de Atterberg

Determinación de límite líquido

LATA Nº	A	B	C
Peso suelo húmedo + lata	40,220	37,630	34,950
Peso suelo seco + lata	36,110	34,140	31,740
Peso de lata	20,850	21,750	20,670
Peso de suelo seco	15,260	12,390	11,070
Peso de agua	19,370	15,880	14,280
Contenido de Humedad %	26,93	28,17	29,00
Número de Golpes N	33	24	17

Determinación de límite plástico

LATA Nº	D	E
Peso suelo húmedo + lata	29,020	26,300
Peso suelo seco + lata	27,720	25,370
Peso de lata	21,430	20,900
Peso de suelo seco	6,290	4,470
Peso de agua	7,590	5,400
Contenido de Humedad %	20,668	20,805



Límite Líquido:	27,9
Límite Plástico:	20,7
Índice de Plasticidad:	7,2

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN IRAZÚ

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

MUESTRA N° 30		**UBICACIÓN:** Cráter Principal, volcán Irazú
COORDENADAS		Plasticidad: Baja Suelo: SC-SM
X	**Y**	
552929	**218224**	

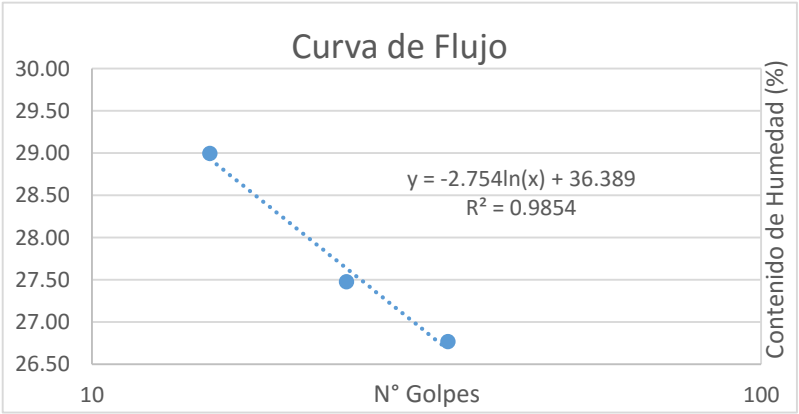
Resultados de Límites de Atterberg

Determinación de límite líquido

LATA Nº	A	B	C
Peso suelo húmedo + lata	40,220	37,630	34,950
Peso suelo seco + lata	36,130	34,080	31,740
Peso de lata	20,850	21,160	20,670
Peso de suelo seco	15,280	12,920	11,070
Peso de agua	19,370	16,470	14,280
Contenido de Humedad %	26,68	27,64	28,93
Número de Golpes N	34	24	15

Determinación de límite plástico

LATA Nº	D	E
Peso suelo húmedo + lata	29,020	26,300
Peso suelo seco + lata	27,720	25,370
Peso de lata	21,430	20,900
Peso de suelo seco	6,290	4,470
Peso de agua	7,590	5,400
Contenido de Humedad %	20,668	20,805



Límite Líquido:	27,5
Límite Plástico:	20,7
Índice de Plasticidad:	6,8

ANEXO 9: CLASIFICACIÓN DETALLADA DE LAS MUESTRAS CON BASE EN SU COMPORTAMIENTO GRANULOMÉTRICO.

Volcán Turrialba

- **Arenas pobremente gradadas SP**

Las arenas SP, predominaron principalmente en los cráteres suroeste y en el interior del central, estos materiales presentaron diversas coloraciones entre grisáceas, café a rojizas, sin embargo predominaron los materiales grisáceos con alteración hidrotermal debido principalmente a la interacción del calor y el agua de las zonas que bordean el cráter activo. La presencia de materia orgánica fue casi nula o muy escasa, ya que la zona se encuentra prácticamente desprovista de vegetación, y el contenido de gravas variaron entre 32,2% y 0,1%.

No se realizó ensayo de plasticidad a estas muestras, ya que el contenido de partículas finas resultó ser muy bajo, y además no se requerían de estos análisis para la clasificación del tipo de suelo.

Para clasificarlas como SP se cumplieron los criterios correspondientes a:

- ✓ El porcentaje de finos (limos y arcillas) menor a un 5%
- ✓ $Cu = D60/D10 < 6$,
- ✓ $Cc = 1 < D^2 30/D10 \times D60 > 3$

En la figura 1 , se presenta un ejemplo de una de las muestras analizadas en laboratorio y clasificada como SP.

Figura 1: Arena SP

- **Arenas con limos SW - SM, y SP - SM**

Estas arenas se localizaron principalmente en la cuenca central, y se caracterizaron por presentar una coloración café a grisácea, con presencia de gravas entre un 30,2% a 6,29%, la presencia de material orgánico en las muestras resultó ser escaso.

Dentro de los análisis de límites líquido y plástico, la mayoría de las muestras resultaron ser muestras NP (no presentaron plasticidad), predominando la presencia de limos ante el contenido de arcillas.

Para clasificar las muestras como SW-SM, se cumplieron los criterios correspondientes a:

- ✓ El porcentaje de finos se encuentra entre un 5% y un 12%
- ✓ $Cu = D60/D10 \geq 6$
- ✓ $Cc = 1 \leq D^2 30/D10 \times D60 \leq 3$.

En la figura 2, se puede observar una muestra de suelo analizada y clasificada como SW-SM.

Para clasificar las muestras como SP-SM se cumplieron los criterios correspondientes a:

- ✓ El porcentaje de finos se encuentra entre un 5% y un 12%
- ✓ $Cu = D60/D10 < 6$
- ✓ $Cc = 1 > D^2 30/D10 \times D60 > 3$.

Figura 2: Ejemplo de arena analizada en laboratorio y clasificada como SW-SM.

- **Arenas limosas SM**

Estas muestras se ubicaron en el cráter noreste del volcán Turrialba, las cuales presentaron coloraciones café claro, con presencia de gravas en porcentajes entre un 33% y un 11%. Estas materiales presentaron por lo general una plasticidad baja.

Para clasificar las muestras como SM, se consideraron los siguientes criterios:

✓ El porcentaje de finos es mayor a un 12%
Finos son ML o MH

En la figura 3, se puede observar una muestra de suelo analizada y clasificada como SM.

Figura 3: Ejemplo de arena analizada en laboratorio y clasificada como SM.

Volcán Irazú

- **Arenas pobremente gradadas SP (Figura 4), cuando:**

✓ El porcentaje de finos es menor a un 5%
✓ $Cu = D_{60}/D_{10} < 6$,
✓ $Cc = 1 < D^2_{30}/D_{10} \times D_{60} > 3$

Figura 4: Ejemplo de arena analizada en laboratorio y clasificada como SP, con porcentaje de finos menor a un 5%.

- **- Arenas, bien gradadas, con limos SW – SM (figura 5), cuando:**

✓ El porcentaje de finos se encuentra entre un 5% y un 12%
✓ $Cu = D_{60}/D_{10} \geq 6$
✓ $Cc = 1 \leq D^2_{30}/D_{10} \times D_{60} \leq 3$.

Figura 5: Ejemplo de arena analizada en laboratorio y clasificada como SW-SM, con porcentaje de finos entre 5% y 12%.

- **Arenas mal gradadas, con limos SP- SM (figura 6), clasificadas así cuando:**

✓ El porcentaje de finos se encuentra entre un 5% y un 12%
✓ $Cu = D_{60}/D_{10} < 6$
✓ $Cc = 1 > D^2_{30}/D_{10} \times D_{60} > 3$.

Figura 6: Ejemplo de arena analizada en laboratorio y clasificada como SP-SM.

- **Arenas limosas (figura 7), consideradas SM cuando:**

✓ El porcentaje de finos es mayor a un 12% Finos son ML o MH

Figura 7: Ejemplo de arena analizada en laboratorio y clasificada como SM, con porcentaje de finos mayor a un 12%.

- **Arenas limosas, clasificadas como SC cuando:**

✓ El porcentaje de finos es mayor a un 12% Finos son CL o CH

ANEXO 10: RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO REALIZADO PARA LA CIMA DEL VOLCÁN IRAZÚ, AÑO 2005.

En todos los cuadros, **fc:** Capacidad de Infiltración (mm/d), **I:** Infiltración (0,01%), **CC:** Capacidad de Campo (% y en mm), **PM:** Punto de Marchitez (% y en mm), **PR:** Profundidad de Raíces (mm), **(CC-PM):** Rango de Agua Disponible (% y en mm), **DS:** Densidad de Suelo (g/cm³), **C1:** Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR, **C2:** Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR, **Kp:** Factor por pendiente (0,01%), **Kv:** Factor por vegetación (0,01%), **Kfc:** Factor estimado con base a la prueba de infiltración (0,01%), **P:** Precipitación Media Mensual (mm), **Pi:** Precipitación que infiltra (mm), **ESC:** Escorrentía Superficial (mm), **ETP:** Evapotranspiración Potencial (mm), **ETR:** Evapotranspiración Real (mm), **HSi:** Humedad de Suelo Inicial (mm), **HD:** Humedad Disponible (mm), **HSf:** Humedad de Suelo Final (mm), **DCC:** Déficit de Capacidad de Campo (mm), **Rp:** Recarga Potencial (mm), **Ret:** Retención de lluvia (mm).

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2005.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 1, CRÁTER DIEGO DE LA HAYA VOLCÁN IRAZÚ.*
ÁREA: *145451,41 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	21792,6	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	250	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	73,83
Kfc	1	**PM**	14,31	54,38
I	1	**(CC-PM)**	5,12	19,46
N° mes con que se inicia Hsi				12

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,90
Ret	28,04	5,00	5,00	12,64	24,20	28,43	17,05	15,65	29,47	40,90	40,22	11,18	257,79
Pi	205,66	35,20	7,80	92,66	177,50	208,47	125,05	114,75	216,13	299,90	294,98	82,02	1860,11
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18	1201,83
HSi	73,83	73,83	63,15	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
C1	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,43	
HD	225,11	54,66	16,57	92,66	196,95	227,93	144,50	134,21	235,58	319,36	314,43	101,47	
ETR	92,03	45,89	16,57	52,19	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	66,43	987,04
HSf	73,83	63,15	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
DCC	0,00	10,69	19,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	113,62	0,00	0,00	21,02	69,66	102,42	18,23	11,75	118,56	198,97	203,25	15,58	873,07

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2005.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 2, CRÁTER DIEGO DE LA HAYA VOLCÁN IRAZÚ.*
ÁREA: *102193,36 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	2179,6	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				12

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,90
Ret	28,04	5,00	5,00	12,64	24,20	28,43	17,05	15,65	29,47	40,90	40,22	11,18	257,79
Pi	205,66	35,20	7,80	92,66	177,50	208,47	125,05	114,75	216,13	299,90	294,98	82,02	1860,11
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18	1201,83
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	
HD	211,10	40,65	7,80	92,66	182,94	213,92	130,50	120,20	221,58	305,35	300,42	87,46	
ETR	92,03	40,65	7,80	52,19	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	46,59	953,19
HSf	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	113,62	0,00	0,00	35,03	69,66	102,42	18,23	11,75	118,56	198,97	203,25	35,42	906,92

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2005.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 3, CRÁTER PLAYA HERMOSA VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *135826,36 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	6734,40	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	250	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	73,83
Kfc	1	**PM**	14,31	54,38
I	1	**(CC-PM)**	5,12	19,46
N° mes con que se inicia Hsi				12

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,90
Ret	28,04	5,00	5,00	12,64	24,20	28,43	17,05	15,65	29,47	40,90	40,22	11,18	257,79
Pi	205,66	35,20	7,80	92,66	177,50	208,47	125,05	114,75	216,13	299,90	294,98	82,02	1860,11
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18	1201,83
HSi	73,83	73,83	63,15	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
C1	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,43	
HD	225,11	54,66	16,57	92,66	196,95	227,93	144,50	134,21	235,58	319,36	314,43	101,47	
ETR	92,03	45,89	16,57	52,19	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	66,43	987,04
HSf	73,83	63,15	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
DCC	0,00	10,69	19,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	113,62	0,00	0,00	21,02	69,66	102,42	18,23	11,75	118,56	198,97	203,25	15,58	873,07

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2005.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 4, CRÁTER PLAYA HERMOSA VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *222660,93 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	6734,40	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				12

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,90
Ret	28,04	5,00	5,00	12,64	24,20	28,43	17,05	15,65	29,47	40,90	40,22	11,18	257,79
Pi	205,66	35,20	7,80	92,66	177,50	208,47	125,05	114,75	216,13	299,90	294,98	82,02	1860,11
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18	1201,83
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	
HD	211,10	40,65	7,80	92,66	182,94	213,92	130,50	120,20	221,58	305,35	300,42	87,46	
ETR	92,03	40,65	7,80	52,19	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	46,59	953,19
HSf	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	113,62	0,00	0,00	35,03	69,66	102,42	18,23	11,75	118,56	198,97	203,25	35,42	906,92

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2005.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 5, CRÁTER PRINCIPAL VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *285775,09 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	30242,2	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				12

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,90
Ret	28,04	5,00	5,00	12,64	24,20	28,43	17,05	15,65	29,47	40,90	40,22	11,18	257,79
Pi	205,66	35,20	7,80	92,66	177,50	208,47	125,05	114,75	216,13	299,90	294,98	82,02	1860,11
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18	1201,83
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	
HD	211,10	40,65	7,80	92,66	182,94	213,92	130,50	120,20	221,58	305,35	300,42	87,46	
ETR	92,03	40,65	7,80	52,19	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	46,59	953,19
HSf	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	113,62	0,00	0,00	35,03	69,66	102,42	18,23	11,75	118,56	198,97	203,25	35,42	906,92

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2005.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 6, CRÁTER PRINCIPAL VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *118697,57 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	30242,2	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	250	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	73,83
Kfc	1	**PM**	14,31	54,38
I	1	**(CC-PM)**	5,12	19,46
N° mes con que se inicia Hsi				12

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,90
Ret	28,04	5,00	5,00	12,64	24,20	28,43	17,05	15,65	29,47	40,90	40,22	11,18	257,79
Pi	205,66	35,20	7,80	92,66	177,50	208,47	125,05	114,75	216,13	299,90	294,98	82,02	1860,11
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18	1201,83
HSi	56,09	73,83	63,15	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	20,67	
C1	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	
HD	207,37	54,66	16,57	92,66	196,95	227,93	144,50	134,21	235,58	319,36	314,43	48,31	
ETR	92,03	45,89	16,57	52,19	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	46,59	967,20
HSf	73,83	63,15	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	56,09	
DCC	0,00	10,69	19,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,74	
Rp	95,89	0,00	0,00	21,02	69,66	102,42	18,23	11,75	118,56	198,97	203,25	0,00	839,75

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2005.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 7, CRÁTER PRINCIPAL VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *56045,71 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	5477,6	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				12

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	233,7	40,2	12,8	105,3	201,7	236,9	142,1	130,4	245,6	340,8	335,2	93,2	2117,90
Ret	28,04	5,00	5,00	12,64	24,20	28,43	17,05	15,65	29,47	40,90	40,22	11,18	257,79
Pi	205,66	35,20	7,80	92,66	177,50	208,47	125,05	114,75	216,13	299,90	294,98	82,02	1860,11
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	92,03	91,78	106,54	104,37	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	93,18	1201,83
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	
HD	211,10	40,65	7,80	92,66	182,94	213,92	130,50	120,20	221,58	305,35	300,42	87,46	
ETR	92,03	40,65	7,80	52,19	107,83	106,06	106,82	103,00	97,56	100,93	91,72	46,59	953,19
HSf	20,67	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	113,62	0,00	0,00	35,03	69,66	102,42	18,23	11,75	118,56	198,97	203,25	35,42	906,92

ANEXO 11: RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO REALIZADO PARA LA CIMA DEL VOLCÁN IRAZÚ, AÑO 2014.

En todos los cuadros, **fc:** Capacidad de Infiltración (mm/d), **I:** Infiltración (0,01%), **CC:** Capacidad de Campo (% y en mm), **PM:** Punto de Marchitez (% y en mm), **PR:** Profundidad de Raíces (mm), **(CC-PM):** Rango de Agua Disponible (% y en mm), **DS:** Densidad de Suelo (g/cm^3), **C1:** Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR, **C2:** Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR, **Kp:** Factor por pendiente (0,01%), **Kv:** Factor por vegetación (0,01%), **Kfc:** Factor estimado con base a la prueba de infiltración (0,01%), **P:** Precipitación Media Mensual (mm), **Pi:** Precipitación que infiltra (mm), **ESC:** Escorrentía Superficial (mm), **ETP:** Evapotranspiración Potencial (mm), **ETR:** Evapotranspiración Real (mm), **HSi:** Humedad de Suelo Inicial (mm), **HD:** Humedad Disponible (mm), **HSf:** Humedad de Suelo Final (mm), **DCC:** Déficit de Capacidad de Campo (mm), **Rp:** Recarga Potencial (mm), **Ret:** Retención de lluvia (mm).

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 1, CRÁTER DIEGO DE LA HAYA VOLCÁN IRAZÚ.*
ÁREA: *145451,41 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	21792,6	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	250	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	73,83
Kfc	1	**PM**	14,31	54,38
I	1	**(CC-PM)**	5,12	19,46
N° mes con que se inicia Hsi				1

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,70
Ret	8,98	5,00	4,50	5,34	14,23	23,15	27,08	16,62	24,00	35,50	16,68	36,90	217,98
Pi	65,82	7,90	0,00	39,16	104,37	169,75	198,62	121,88	176,00	260,30	122,32	270,60	1536,72
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	1189,93
HSi	73,83	73,83	54,38	54,38	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
C1	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	85,28	27,36	0,00	39,16	104,37	189,21	218,07	141,34	195,46	279,76	141,78	290,06	
ETR	47,14	27,36	0,00	39,16	54,32	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	863,05
HSf	73,83	54,38	54,38	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
DCC	0,00	19,46	19,46	19,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	18,68	0,00	0,00	0,00	30,59	66,47	89,76	19,68	78,44	161,68	30,60	177,79	673,67

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 2, CRÁTER DIEGO DE LA HAYA VOLCÁN IRAZÚ.*
ÁREA: *102193,36 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	2179,6	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				1

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,70
Ret	8,98	5,00	4,50	5,34	14,23	23,15	27,08	16,62	24,00	35,50	16,68	36,90	217,98
Pi	65,82	7,90	0,00	39,16	104,37	169,75	198,62	121,88	176,00	260,30	122,32	270,60	1536,72
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	1189,93
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	71,27	13,35	0,00	39,16	104,37	175,20	204,06	127,33	181,45	265,75	127,77	276,05	
ETR	47,14	13,35	0,00	39,16	54,32	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	849,04
HSf	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	18,68	0,00	0,00	0,00	44,60	66,47	89,76	19,68	78,44	161,68	30,60	177,79	687,68

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 3, CRÁTER PLAYA HERMOSA VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *135826,36 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	6734,40	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	250	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	73,83
Kfc	1	**PM**	14,31	54,38
I	1	**(CC-PM)**	5,12	19,46
N° mes con que se inicia Hsi				1

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,70
Ret	8,98	5,00	4,50	5,34	14,23	23,15	27,08	16,62	24,00	35,50	16,68	36,90	217,98
Pi	65,82	7,90	0,00	39,16	104,37	169,75	198,62	121,88	176,00	260,30	122,32	270,60	1536,72
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	1189,93
HSi	73,83	73,83	54,38	54,38	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
C1	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	85,28	27,36	0,00	39,16	104,37	189,21	218,07	141,34	195,46	279,76	141,78	290,06	
ETR	47,14	27,36	0,00	39,16	54,32	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	863,05
HSf	73,83	54,38	54,38	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
DCC	0,00	19,46	19,46	19,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	18,68	0,00	0,00	0,00	30,59	66,47	89,76	19,68	78,44	161,68	30,60	177,79	673,67

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 4, CRÁTER PLAYA HERMOSA VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *222660,93 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	6734,40	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				1

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,70
Ret	8,98	5,00	4,50	5,34	14,23	23,15	27,08	16,62	24,00	35,50	16,68	36,90	217,98
Pi	65,82	7,90	0,00	39,16	104,37	169,75	198,62	121,88	176,00	260,30	122,32	270,60	1536,72
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	1189,93
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	71,27	13,35	0,00	39,16	104,37	175,20	204,06	127,33	181,45	265,75	127,77	276,05	
ETR	47,14	13,35	0,00	39,16	54,32	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	849,04
HSf	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	18,68	0,00	0,00	0,00	44,60	66,47	89,76	19,68	78,44	161,68	30,60	177,79	687,68

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 5, CRÁTER PRINCIPAL VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *285775,09 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	30242,2	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				1

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,70
Ret	8,98	5,00	4,50	5,34	14,23	23,15	27,08	16,62	24,00	35,50	16,68	36,90	217,98
Pi	65,82	7,90	0,00	39,16	104,37	169,75	198,62	121,88	176,00	260,30	122,32	270,60	1536,72
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	1189,93
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	71,27	13,35	0,00	39,16	104,37	175,20	204,06	127,33	181,45	265,75	127,77	276,05	
ETR	47,14	13,35	0,00	39,16	54,32	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	849,04
HSf	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	18,68	0,00	0,00	0,00	44,60	66,47	89,76	19,68	78,44	161,68	30,60	177,79	687,68

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 6, CRÁTER PRINCIPAL VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *118697,57 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	30242,2	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	250	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	73,83
Kfc	1	**PM**	14,31	54,38
I	1	**(CC-PM)**	5,12	19,46
N° mes con que se inicia Hsi				1

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,70
Ret	8,98	5,00	4,50	5,34	14,23	23,15	27,08	16,62	24,00	35,50	16,68	36,90	217,98
Pi	65,82	7,90	0,00	39,16	104,37	169,75	198,62	121,88	176,00	260,30	122,32	270,60	1536,72
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	1189,93
HSi	20,67	54,38	54,38	54,38	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
C1	1,00	0,41	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	32,12	7,90	0,00	39,16	104,37	189,21	218,07	141,34	195,46	279,76	141,78	290,06	
ETR	32,12	7,90	0,00	39,16	54,32	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	828,57
HSf	54,38	54,38	54,38	54,38	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	73,83	
DCC	19,46	19,46	19,46	19,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	0,00	0,00	0,00	0,00	30,59	66,47	89,76	19,68	78,44	161,68	30,60	177,79	654,99

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 7, CRÁTER PRINCIPAL VOLCÁN IRAZÚ*
ÁREA: *56045,71 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	5477,6	**Ds**	1,52	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	19,43	20,67
Kfc	1	**PM**	14,31	15,23
I	1	**(CC-PM)**	5,12	5,45
N° mes con que se inicia Hsi				1

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	74,8	12,9	4,5	44,5	118,6	192,9	225,7	138,5	200	295,8	139	307,5	1754,70
Ret	8,98	5,00	4,50	5,34	14,23	23,15	27,08	16,62	24,00	35,50	16,68	36,90	217,98
Pi	65,82	7,90	0,00	39,16	104,37	169,75	198,62	121,88	176,00	260,30	122,32	270,60	1536,72
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	94,28	88,00	102,26	101,68	108,64	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	1189,93
HSi	20,67	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
C1	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	71,27	13,35	0,00	39,16	104,37	175,20	204,06	127,33	181,45	265,75	127,77	276,05	
ETR	47,14	13,35	0,00	39,16	54,32	103,29	108,85	102,20	97,56	98,63	91,72	92,81	849,04
HSf	20,67	15,23	15,23	15,23	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	20,67	
DCC	0,00	5,45	5,45	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	18,68	0,00	0,00	0,00	44,60	66,47	89,76	19,68	78,44	161,68	30,60	177,79	687,68

ANEXO 12: RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS, CIMA DEL VOLCÁN TURRIALBA

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 26 marzo del 2014.

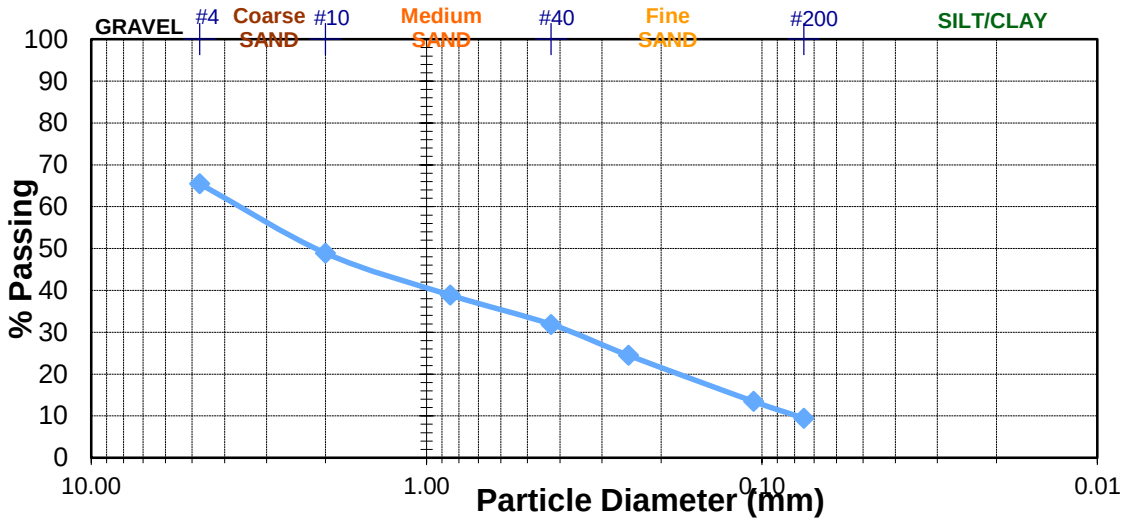
MUESTRA N° 1	**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SM. Arena limosa con gravas, bien gradadas.

X	Y
562802	222956

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 698,9 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	230,6	33,0	67,0
10	2.00	116,0	16,6	50,4
20	0.85	69,0	9,9	40,5
40	0.43	48,9	7,0	33,5
60	0.25	50,7	7,3	26,3
140	0.11	72,9	10,4	15,9
200	0.075	24,0	3,4	12,4
Pan		84,7	12,1	
Total		696,8	99,7	



D_{10}:	0,0592	C_u:	60,701		
D_{30}:	0,5267	C_c:	1,303		
D_{60}:	3,5951				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 26 marzo del 2014.

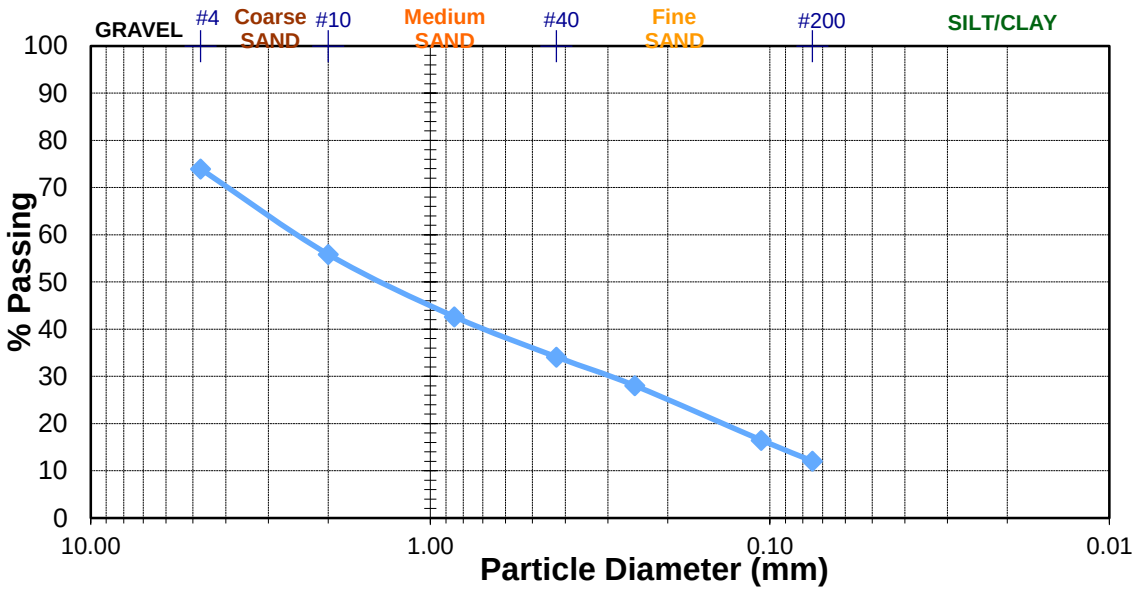
MUESTRA N° 2	**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.

COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SM Arena limosa con gravas, bien gradadas.
X	Y	
562713	222898	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 692.3 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	180,3	26,0	74,0
10	2.00	125,3	18,1	55,9
20	0.85	91,5	13,2	42,6
40	0.43	59,1	8,5	34,1
60	0.25	42,1	6,1	28,0
140	0.11	80,0	11,6	16,5
200	0.075	30,5	4,4	12,1
Pan		81,5	11,8	0,3
Total		690,3	99,7	



D_{10}:	0,061	C_u:	43,113
D_{30}:	0,4855	C_c:	1,467
D_{60}:	2,6317		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 26 de marzo del 2014.

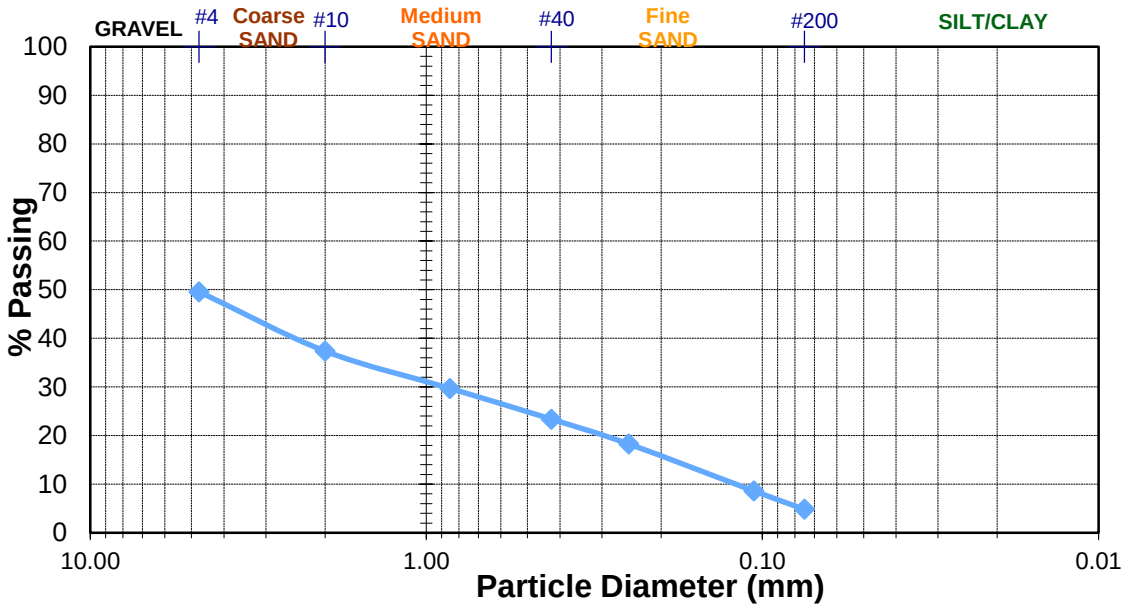
MUESTRA N° 3	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo: GP** Gravas pobremente gradadas.

X	Y
562408	222657

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 744,0 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	375,0	50,4	49,6
10	2.00	91,0	12,2	37,4
20	0.85	57,0	7,7	29,7
40	0.43	47,0	6,3	23,4
60	0.25	38,0	5,1	18,3
140	0.11	72,0	9,7	8,6
200	0.075	28	3,8	4,8
Pan		35,7	4,8	0,0
Total		743,7	0,0	



D_{10}:	0,1546	C_u:	37,139
D_{30}:	0,8848	C_c:	0,882
D_{60}:	5,7425		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

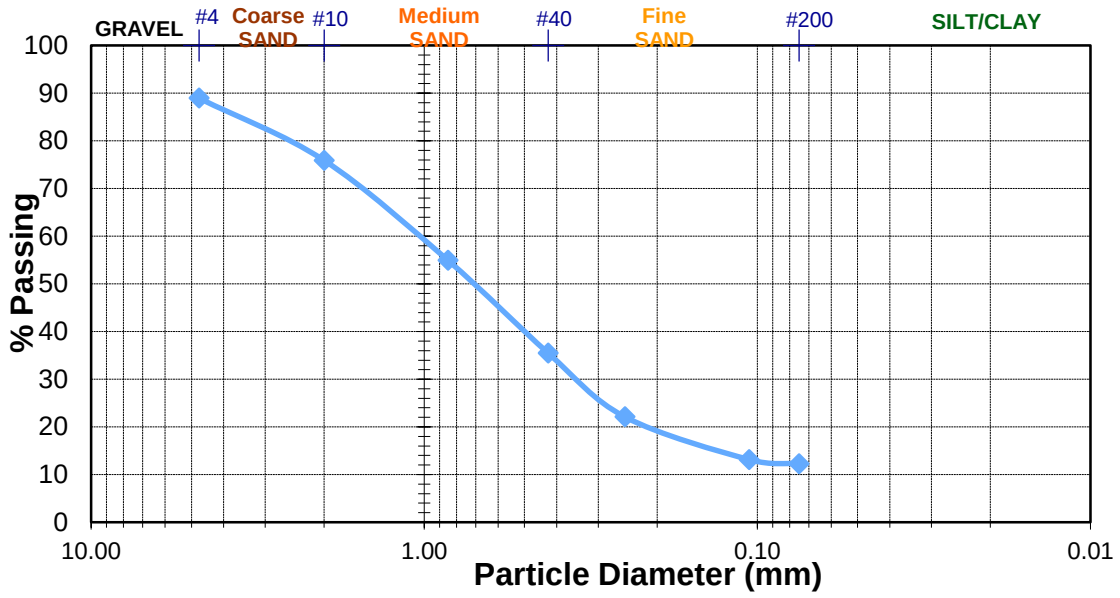
Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014.

MUESTRA N° 4		**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SM Arenas limosa, bien gradadas.
X	**Y**	
562903	**223220**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 821,9 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	90,4	11,0	89,0
10	2.00	107,3	13,1	75,9
20	0.85	172,2	21,0	55,0
40	0.43	160,1	19,5	35,5
60	0.25	110,1	13,4	22,1
140	0.11	73,6	9,0	13,2
200	0.075	7,1	0,9	12,3
Pan		99,0	12,0	0,3
Total		819,8	99,7	



D_{10}:	0,0599	C_u:	18,661
D_{30}:	0,4014	C_c:	2,409
D_{60}:	1,1171		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

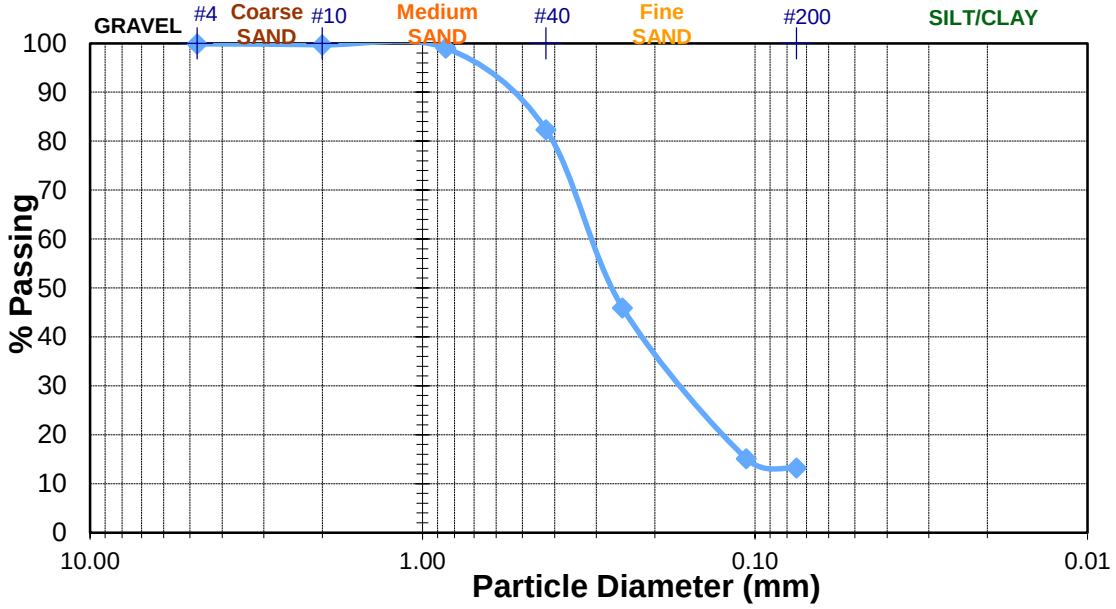
Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014.

MUESTRA N° 5		**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SP Arenas, pobremente gradadas.
X	**Y**	
563012	**223066**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 844 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	1,2	0,1	99,9
10	2.00	1,6	0,2	99,7
20	0.85	5,8	0,7	99,0
40	0.43	140,8	16,7	82,3
60	0.25	307,1	36,4	45,9
140	0.11	260,1	30,8	15,1
200	0.075	16,0	1,9	13,2
Pan		110,0	13,0	0,2
Total		842,6	99,8	



D_{10}:	0,0558	C_u:	8,935
D_{30}:	0,2364	C_c:	2,006
D_{60}:	0,4989		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

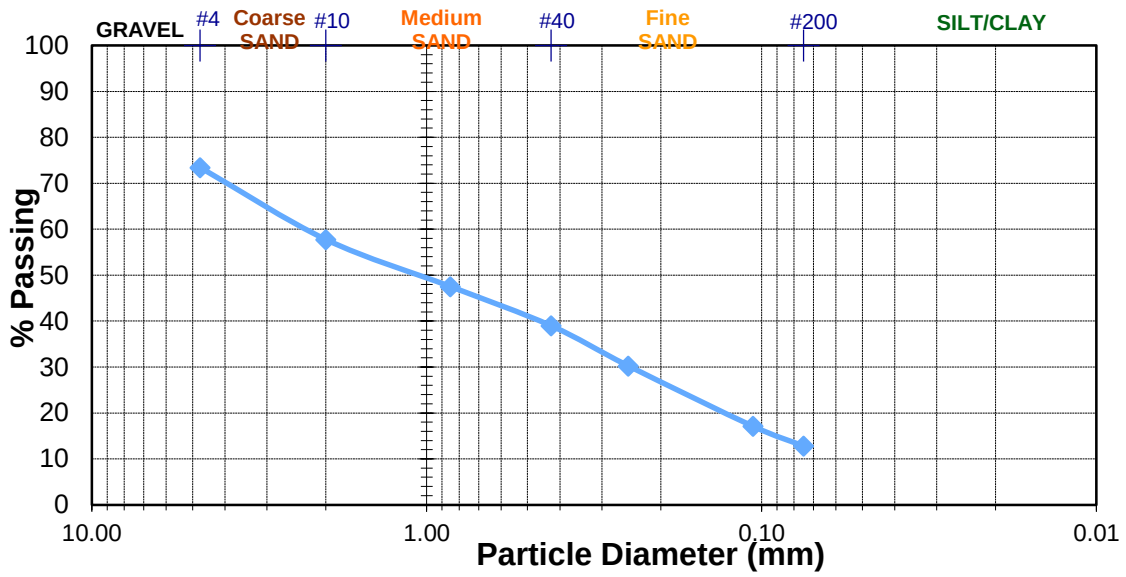
Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014.

MUESTRA N° 6		**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SM Arenas limosa con gravas.
X	**Y**	
562987	**222918**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 733,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	195,0	26,6	73,4
10	2.00	115,0	15,7	57,7
20	0.85	75,0	10,2	47,5
40	0.43	62,7	8,5	39,0
60	0.25	64,0	8,7	30,2
140	0.11	96,5	13,2	17,1
200	0.075	31,3	4,3	12,8
Pan		90,0	12,3	0,5
Total		729,5	99,5	



D_{10}:	0,057	C_u:	42,062
D_{30}:	0,4176	C_c:	1,275
D_{60}:	2,3984		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

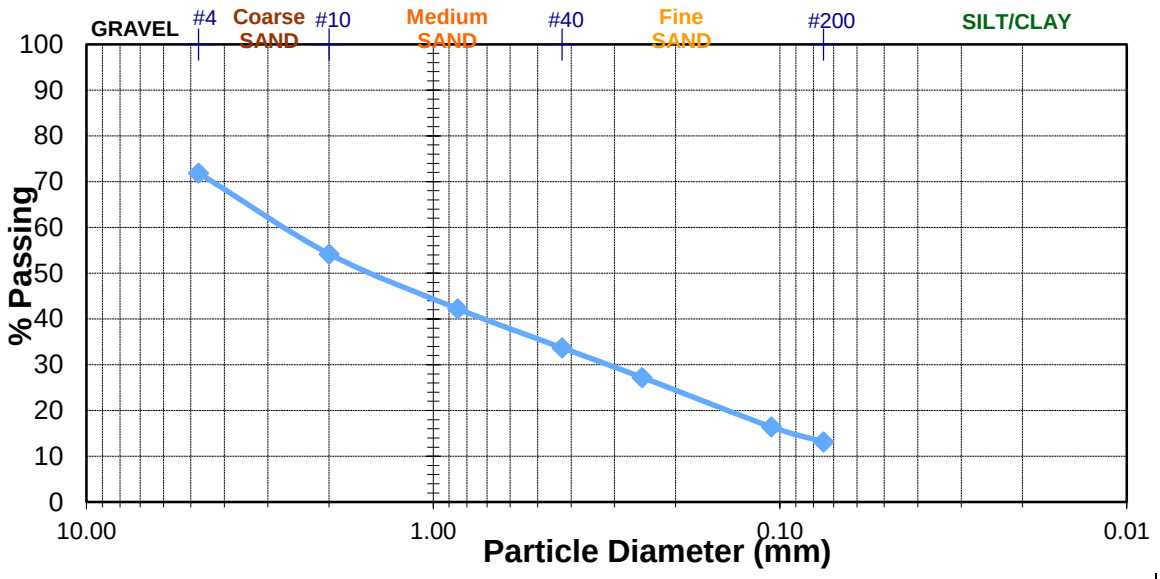
Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014.

MUESTRA N° 7		**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SM Arena limosa con gravas.
X	**Y**	
562773	**223072**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 652,4 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	183,5	28,1	71,9
10	2.00	115,2	17,7	54,2
20	0.85	78,3	12,0	42,2
40	0.43	55,7	8,5	33,7
60	0.25	42,0	6,4	27,2
140	0.11	70,6	10,8	16,4
200	0.075	21,1	3,2	13,2
Pan		83,0	12,7	0,5
Total		649,4	99,5	



D_{10}:	0,0555	C_u:	52,336
D_{30}:	0,4925	C_c:	1,505
D_{60}:	2,9042		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014

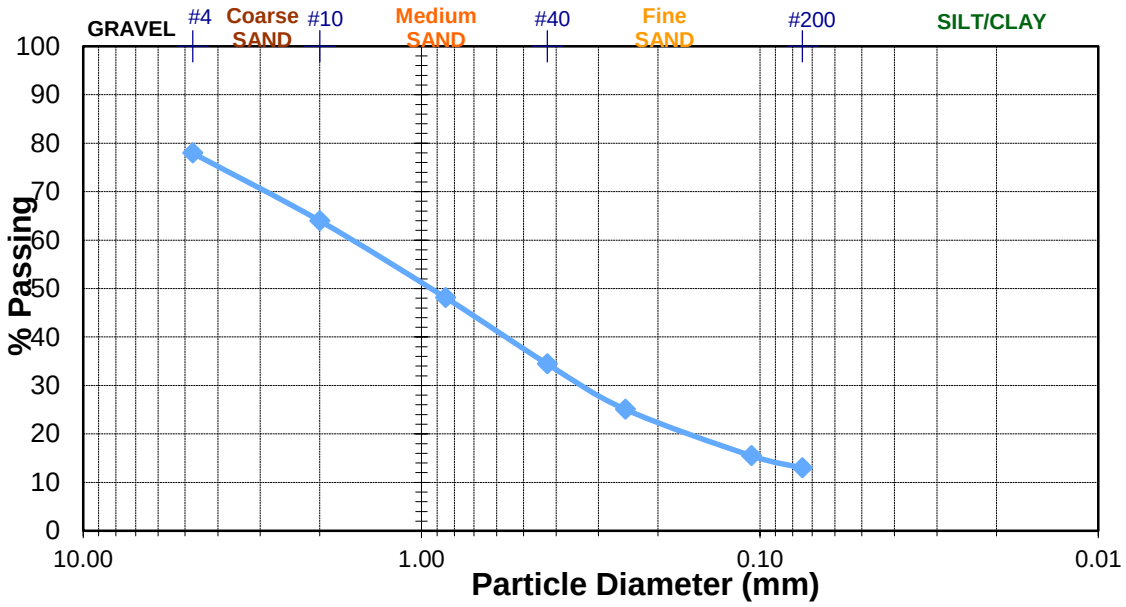
MUESTRA N° 8	**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.

COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SM Arena limosa con gravas.
X	**Y**	
562657	**222911**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 549,2 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	121,0	22,0	78,0
10	2.00	76,7	14,0	64,0
20	0.85	87,0	15,8	48,2
40	0.43	75,2	13,7	34,5
60	0.25	51,4	9,4	25,1
140	0.11	52,6	9,6	15,5
200	0.075	13,8	2,5	13,0
Pan		70,0	12,7	0,3
Total		547,7	99,7	



D_{10}:	0,0565		C_u:	30,226	
D_{30}:	0,4315		C_c:	1,931	
D_{60}:	1,7069				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

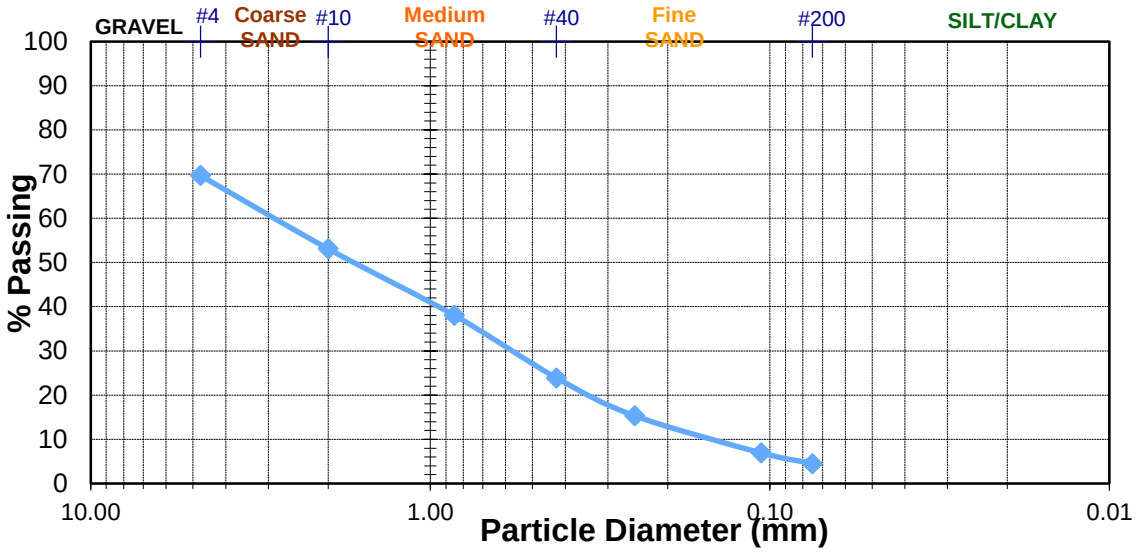
Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014

MUESTRA N° 9		**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con gravas pobremente gradada.
X	**Y**	
562469	**223039**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	241,1	30,3	69,7
10	2.00	131,8	16,6	53,1
20	0.85	119,8	15,1	38,1
40	0.43	112,7	14,2	23,9
60	0.25	68,3	8,6	15,3
140	0.11	66,8	8,4	6,9
200	0.075	19,1	2,4	4,5
Pan		35,1	4,4	0,1
Total		794,1	99,9	



D_{10}:	0,1785	C_u:	17,622
D_{30}:	0,6498	C_c:	0,752
D_{60}:	3,1446		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

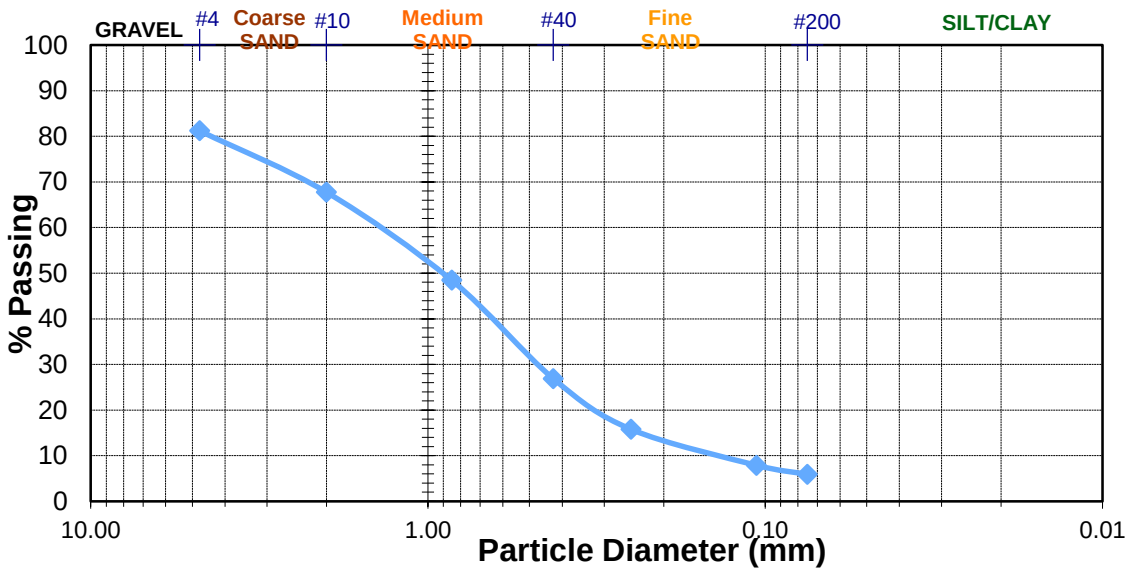
Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014

MUESTRA N° 10		**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arenas con limos y gravas.
X	**Y**	
562450	**222864**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 719,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	135,3	18,8	81,2
10	2.00	96,8	13,5	67,7
20	0.85	139,0	19,3	48,4
40	0.43	155,1	21,6	26,9
60	0.25	79,9	11,1	15,8
140	0.11	56,8	7,9	7,9
200	0.075	14,2	2,0	5,9
Pan		40,4	5,6	0,3
Total		717,5	99,7	



D_{10}:	0,1446	**C_u:**	10,616
D_{30}:	0,5066	**C_c:**	1,156
D_{60}:	1,5352		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

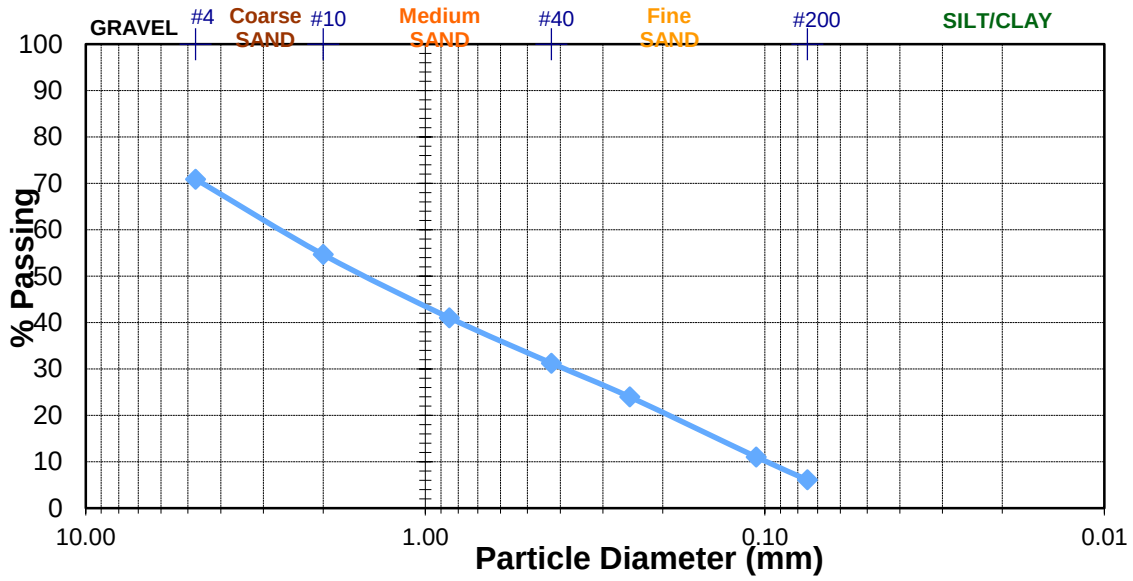
Fecha de toma de muestra: 30 de abril del 2014

MUESTRA N° 11	**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arenas con limos y gravas.
X / **Y**	
562722 / **222858**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 705.3 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	205,3	29,1	70,9
10	2.00	114,6	16,2	54,6
20	0.85	96,0	13,6	41,0
40	0.43	69,0	9,8	31,2
60	0.25	51,3	7,3	24,0
140	0.11	91,2	12,9	11,0
200	0.075	34,8	4,9	6,1
Pan		42,0	6,0	0,2
Total		704,2	99,8	



D_{10}:	0,0992	C_u:	29,327
D_{30}:	0,57	C_c:	1,125
D_{60}:	2,9099		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014

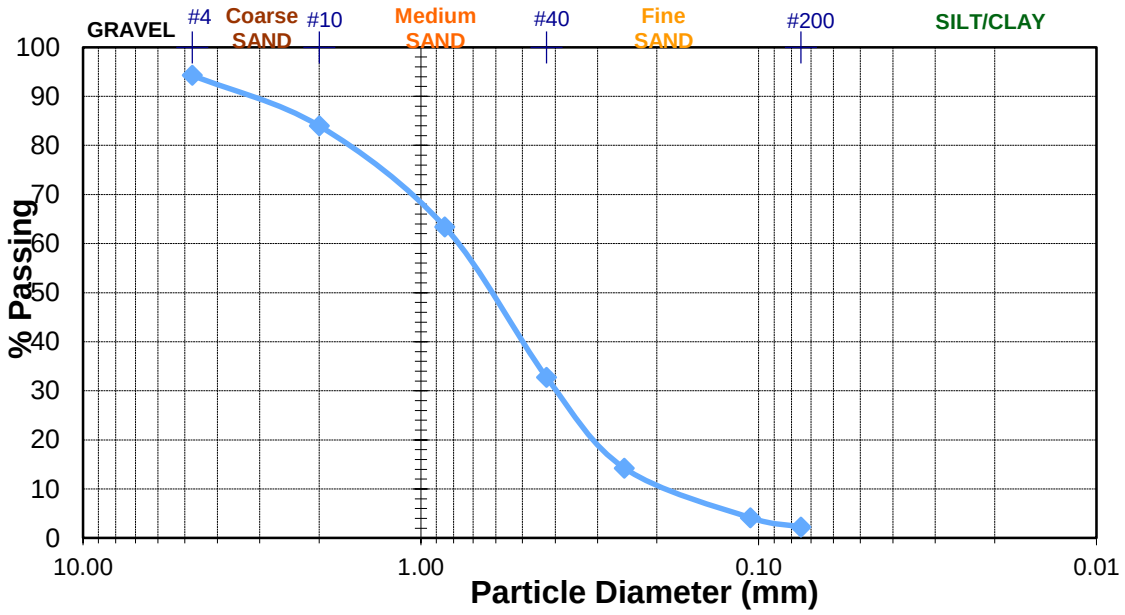
MUESTRA N° 12	**UBICACIÓN:** Cráter suroeste, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena pobremente gradada.

X	Y
561971	222413

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 317,6 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	18,1	5,7	94,3
10	2.00	32,8	10,3	84,0
20	0.85	65,3	20,6	63,4
40	0.43	97,3	30,6	32,8
60	0.25	58,8	18,5	14,3
140	0.11	32,1	10,1	4,1
200	0.075	6,0	1,9	2,3
Pan		6,8	2,1	0,1
Total		317,18	99,9	



D_{10}:	0,1785	C_u:	4,468
D_{30}:	0,4262	C_c:	1,275
D_{60}:	0,7977		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra : 27 de agosto del 2014

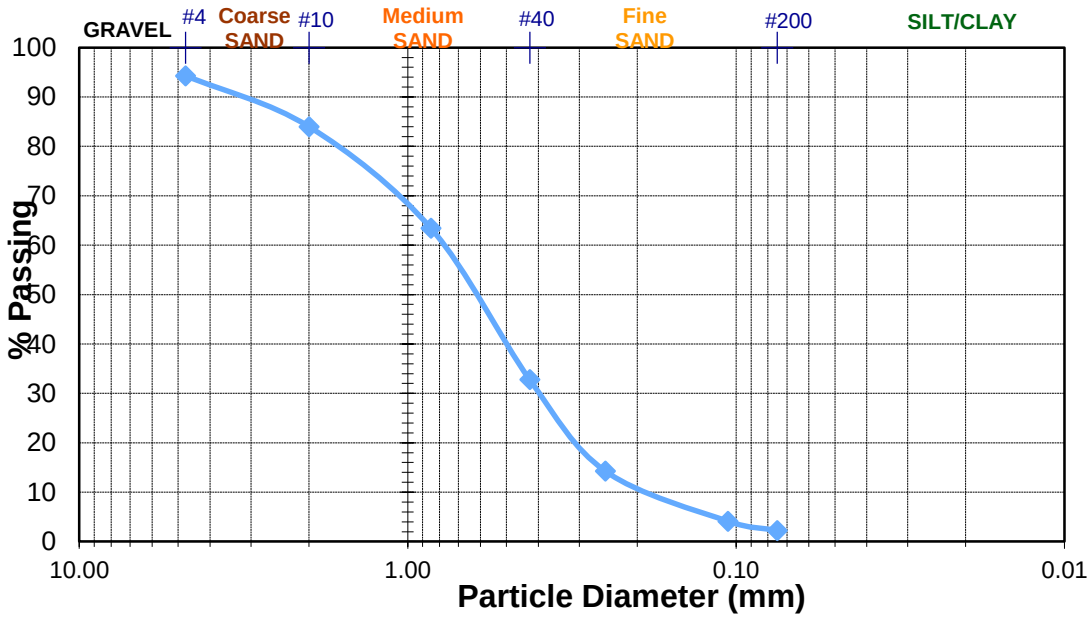
MUESTRA N° 13	**UBICACIÓN:** Cráter suroeste, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena pobremente gradada.

X	**Y**
561976	**222506**

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 329, 1g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	20,1	6,1	93,9
10	2.00	34,3	10,4	83,5
20	0.85	66,3	20,1	63,3
40	0.43	99,5	30,2	33,1
60	0.25	60,0	18,2	14,9
140	0.11	33,7	10,2	4,6
200	0.075	6,0	1,8	2,8
Pan		7,8	2,4	0,4
Total		327,67	99,6	



D_{10}:	0,1733	C_u:	4,608
D_{30}:	0,4233	C_c:	1,295
D_{60}:	0,7984		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014

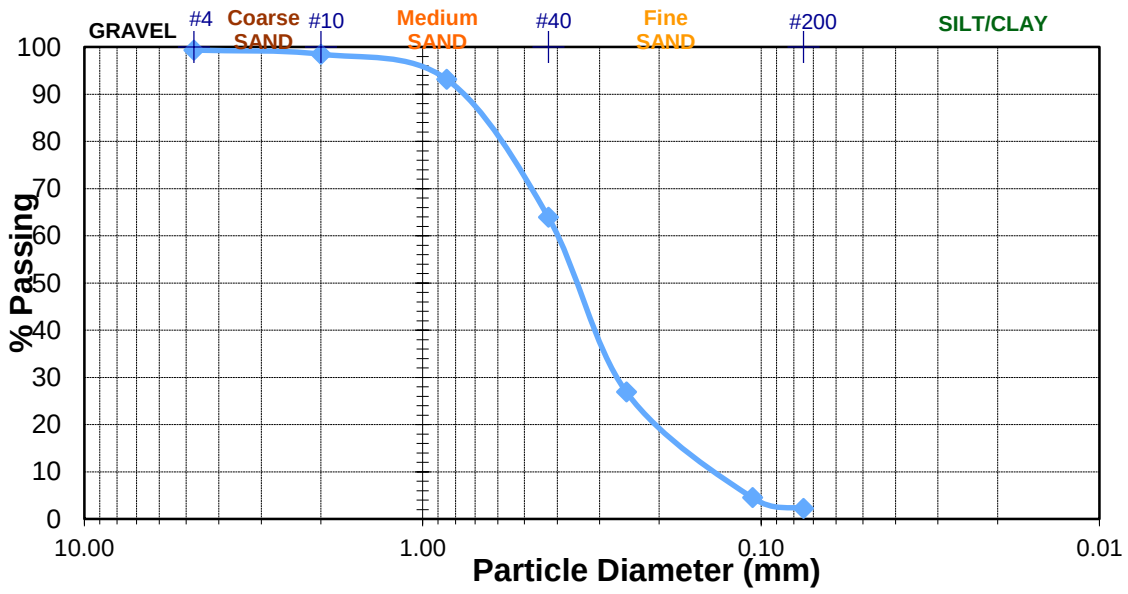
MUESTRA N° 14	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena pobremente gradada.

X	**Y**
562074	**222746**

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 771,0 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	5,0	0,6	99,4
10	2.00	6,7	0,9	98,5
20	0.85	40,8	5,3	93,2
40	0.43	225,5	29,2	63,9
60	0.25	285,3	37,0	26,9
140	0.11	172,7	22,4	4,5
200	0.075	17,5	2,3	2,3
Pan		17,2	2,2	0,0
Total		770,7	100	



D_{10}:	0,1512	**C_u:**	3,738	
D_{30}:	0,3168	**C_c:**	1,174	
D_{60}:	0,5652			

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014

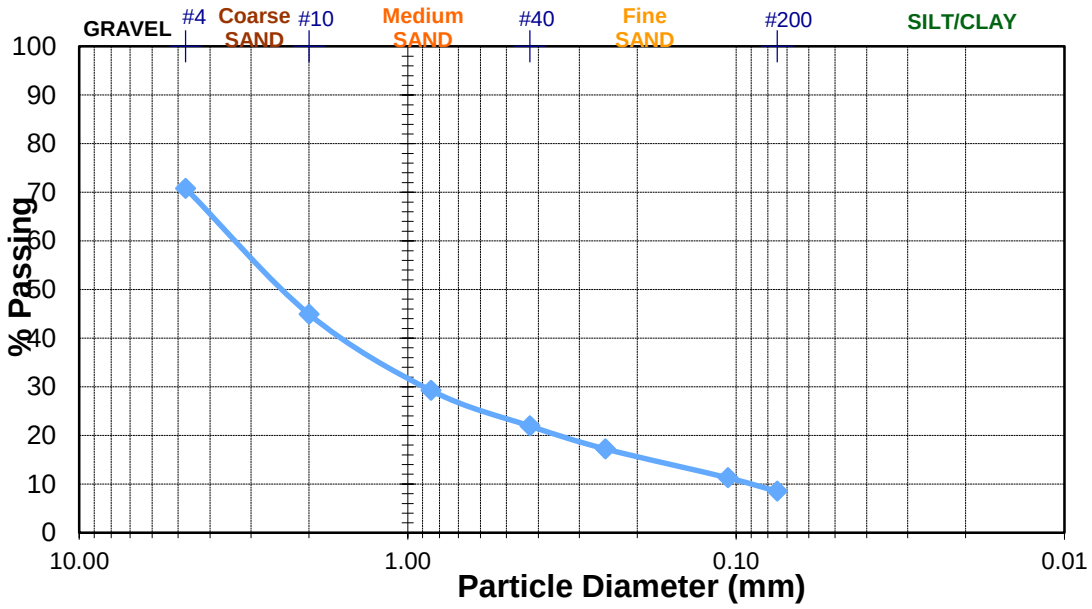
MUESTRA N° 15	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.

COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arenas con limos y gravas.
X	**Y**	
562134	**22873**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 890,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	252,9	28,4	71,6
10	2.00	220,5	24,8	46,8
20	0.85	138,8	15,6	31,3
40	0.43	67,1	7,5	23,7
60	0.25	44,6	5,0	18,7
140	0.11	56,0	6,3	12,4
200	0.075	28,9	3,2	9,2
Pan		75,0	8,4	0,8
Total		883,8	99,2	



D_{10}:	0,0821	C_u:	42,209		
D_{30}:	0,7912	C_c:	2,198		
D_{60}:	3,467				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014

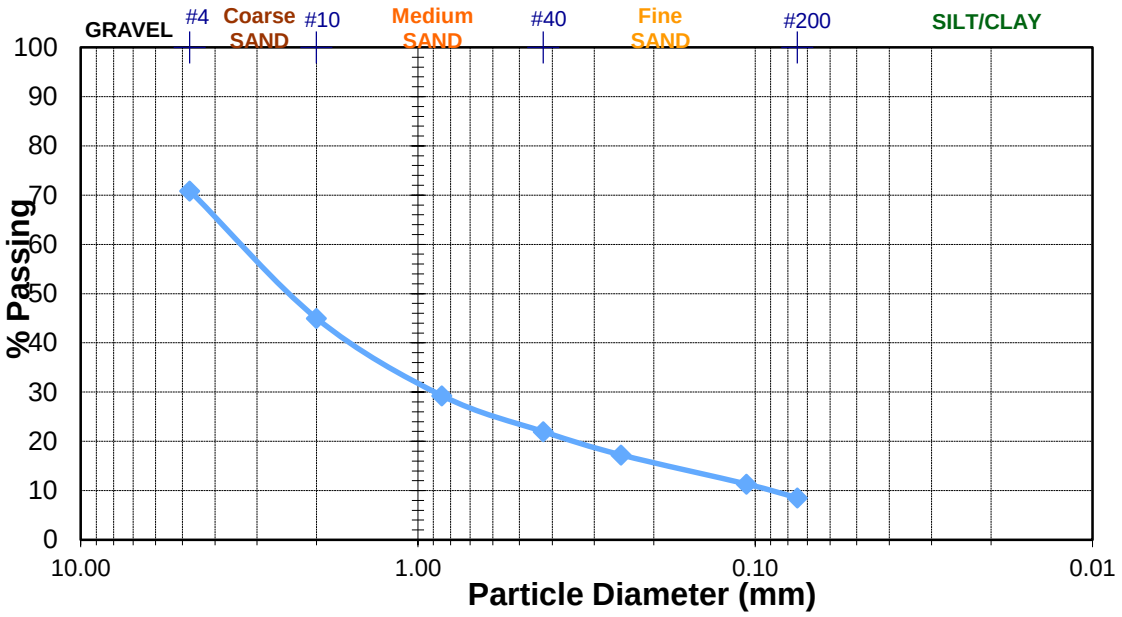
MUESTRA N° 16	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arenas con limos y gravas.

X	**Y**
562179	**223071**

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 860,2 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	250,9	29,2	70,8
10	2.00	222,5	25,9	45,0
20	0.85	135,1	15,7	29,3
40	0.43	62,8	7,3	22,0
60	0.25	40,6	4,7	17,2
140	0.11	51,0	5,9	11,3
200	0.075	23,9	2,8	8,5
Pan		72,0	8,4	0,2
Total		858,8	99,8	



D_{10}:	0,0909	**C_u:**	39,651
D_{30}:	0,8946	**C_c:**	2,443
D_{60}:	3,6041		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

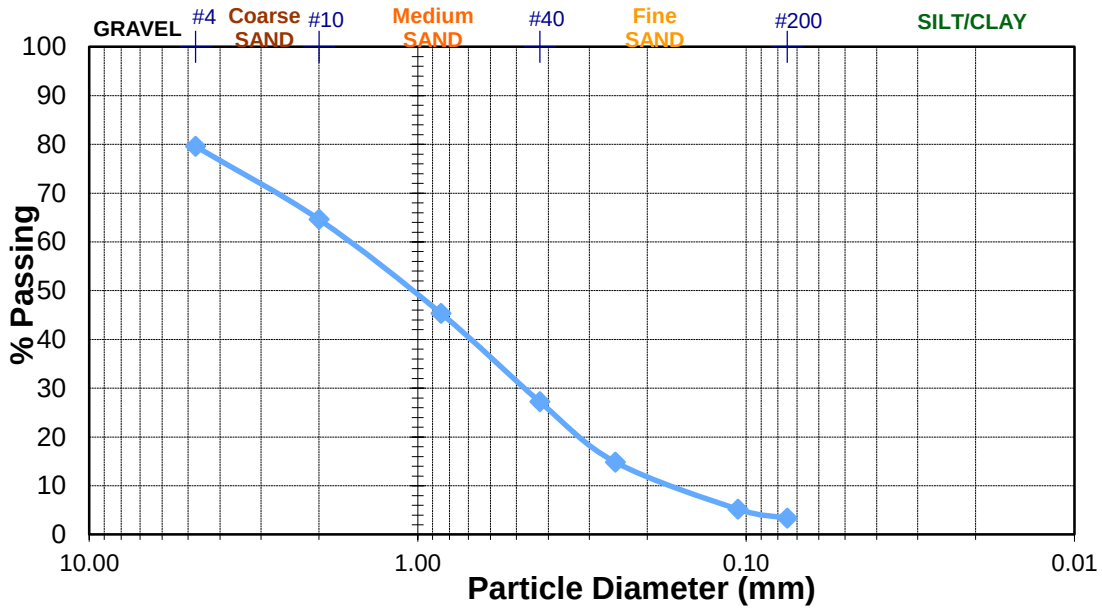
Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014.

MUESTRA N° 17		**UBICACIÓN:** Cráter suroeste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SP Arenas con gravas pobremente gradadas.
X	**Y**	
562045	**222318**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 680,8 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	152,9	22,5	77,5
10	2.00	105,1	15,4	62,1
20	0.85	130,2	19,1	43,0
40	0.43	136,1	20,0	23,0
60	0.25	79,2	11,6	11,4
140	0.11	54,8	8,0	3,3
200	0.075	4,8	0,7	2,6
Pan		15,2	2,2	0,4
Total		678,3	99,6	



D_{10}:	0,2299	C_u:	8,146
D_{30}:	0,5999	C_c:	0,836
D_{60}:	1,8724		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

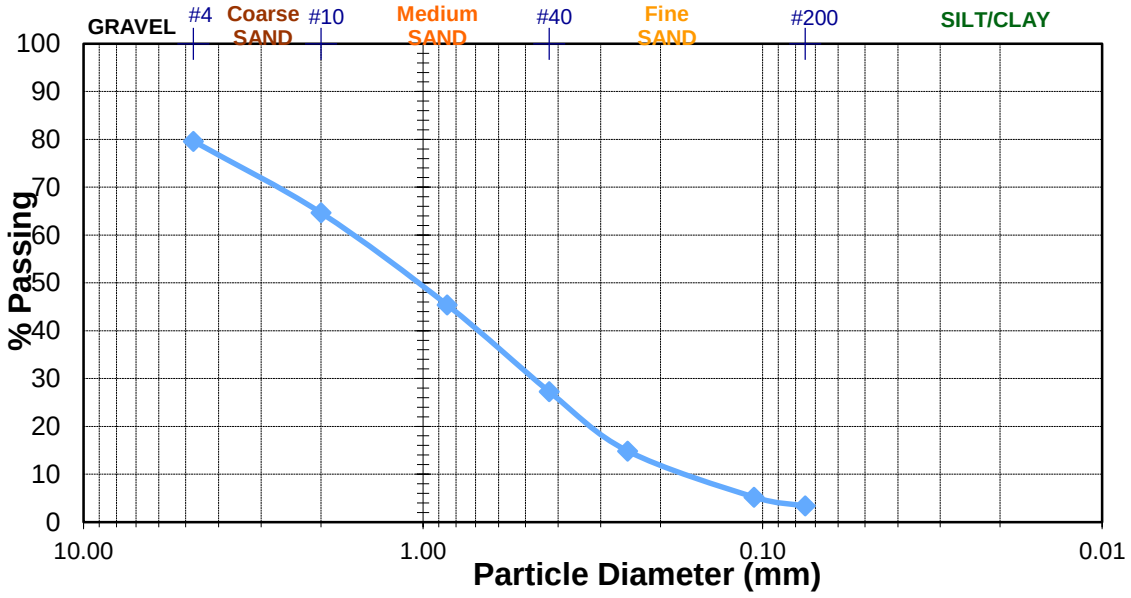
Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014.

MUESTRA N° 18		**UBICACIÓN:** Cráter suroeste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SP Arenas con gravas, pobremente gradadas
X	**Y**	
562114	**222303**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 791,8 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	161,4	20,4	79,6
10	2.00	118,6	15,0	64,6
20	0.85	152,4	19,2	45,4
40	0.43	143,6	18,1	27,3
60	0.25	98,2	12,4	14,9
140	0.11	76,3	9,6	5,2
200	0.075	14,8	1,9	3,3
Pan		25,2	3,2	0,2
Total		790,5	99,8	



D_{10}:	0,1934	C_u:	8,896
D_{30}:	0,5588	C_c:	0,938
D_{60}:	1,7205		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

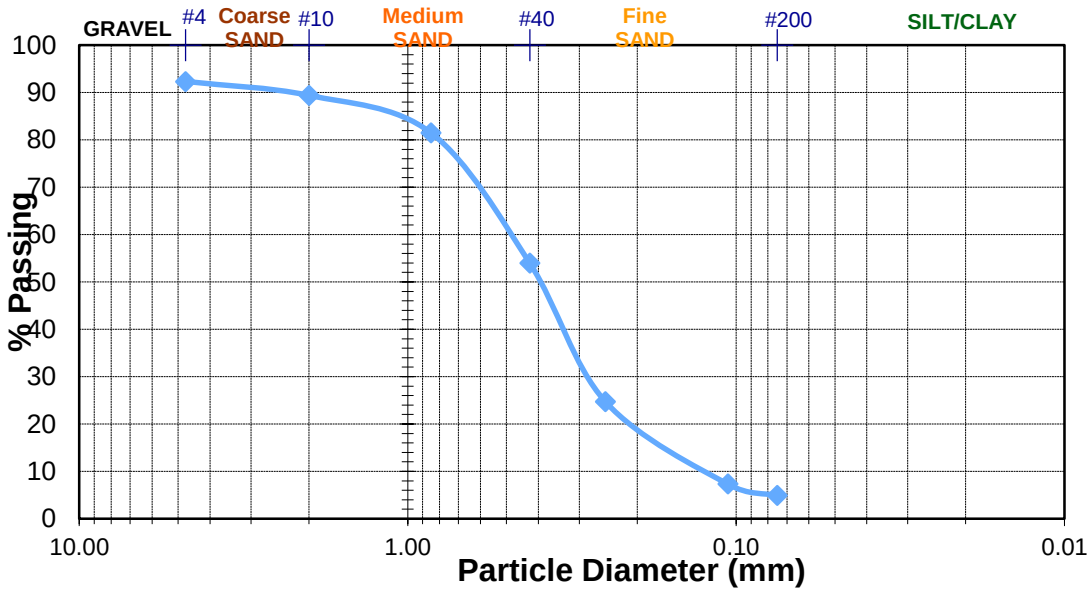
Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014.

MUESTRA N° 19		**UBICACIÓN:** Cráter suroeste, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SP-SM Arenas con limos, pobremente gradadas.
X	**Y**	
562329	**222357**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 814 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	56,0	6,9	93,1
10	2.00	36,0	4,4	88,7
20	0.85	78,0	9,6	79,1
40	0.43	212,0	26,0	53,1
60	0.25	220,0	27,0	26,1
140	0.11	141,5	17,4	8,8
200	0.075	27,6	3,4	5,4
Pan		40,0	4,9	0,5
Total		811,1	99,5	



D_{10}:	0,1188	C_u:	5,39		
D_{30}:	0,3274	C_c:	1,409		
D_{60}:	0,6403				

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 27 de agosto del 2014

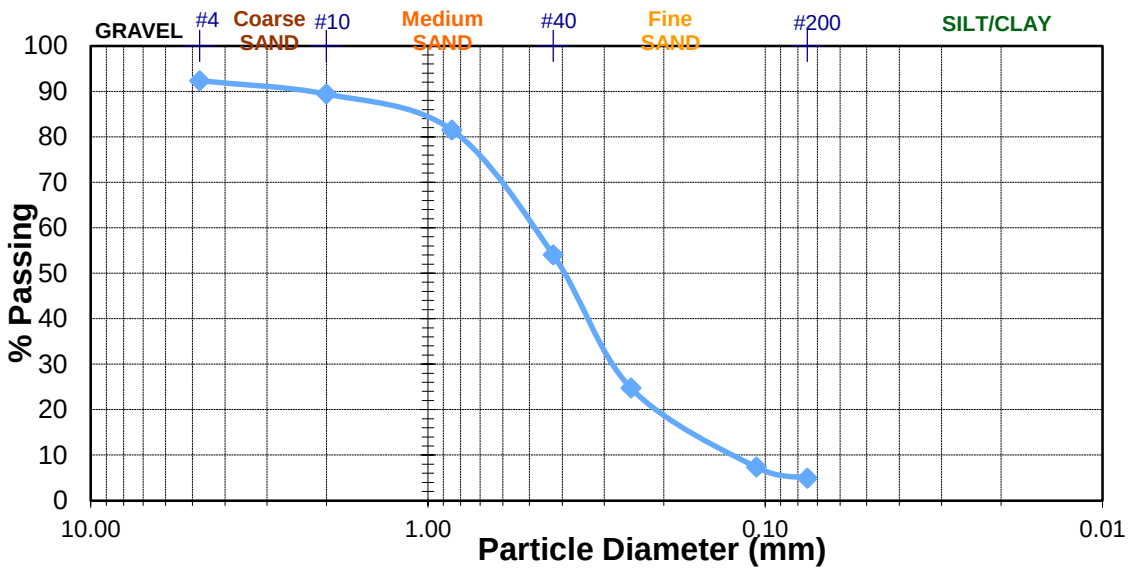
MUESTRA N° 20	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arenas pobremente gradadas.

X	**Y**
562482	**222377**

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 706,4 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	54,2	7,7	92,3
10	2.00	20,8	2,9	89,4
20	0.85	55,7	7,9	81,5
40	0.43	194,3	27,5	54,0
60	0.25	206,7	29,3	24,7
140	0.11	122,9	17,4	7,3
200	0.075	17,1	2,4	4,9
Pan		32,2	4,6	0,4
Total		703,9	99,6	



D_{10}:	0,1324	**C_u:**	4,738
D_{30}:	0,3303	**C_c:**	1,314
D_{60}:	0,6272		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 29 de octubre del 2014

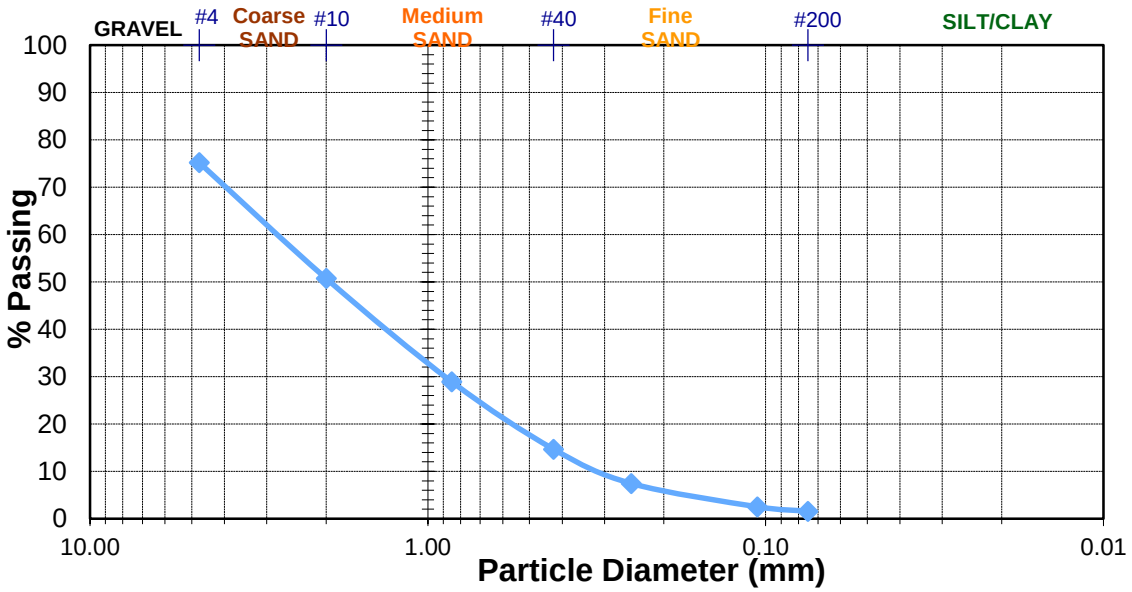
MUESTRA N° 21	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arenas con gravas, pobremente gradadas.

X	Y
562234	222572

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 788,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	195,7	24,8	75,2
10	2.00	192,9	24,5	50,7
20	0.85	171,9	21,8	28,9
40	0.43	112,2	14,2	14,7
60	0.25	57,2	7,3	7,4
140	0.11	38,8	4,9	2,5
200	0.075	7,4	0,9	1,6
Pan		11,8	1,5	1,6
Total		787,9	99,9	0,1



D_{10}:	0,3142	C_u:	9,699
D_{30}:	0,8977	C_c:	0,842
D_{60}:	3,0473		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 29 de octubre del 2014

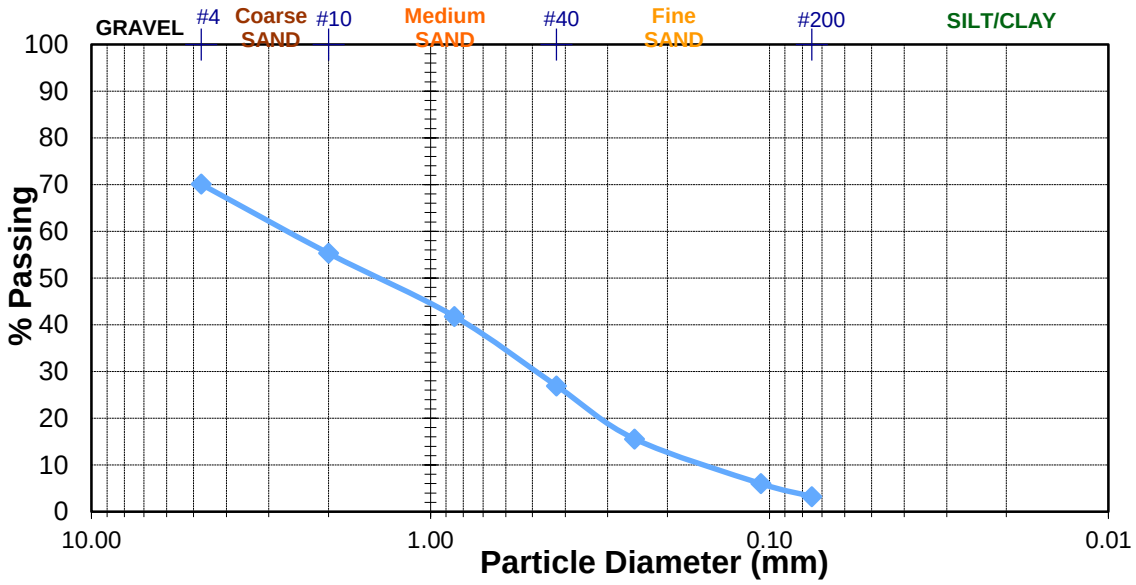
MUESTRA N° 22	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP Arena con gravas, pobremente gradadas.

X	Y
562239	222745

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 705 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	210,4	29,9	70,1
10	2.00	104,1	14,8	55,3
20	0.85	95,0	13,5	41,8
40	0.43	104,6	14,9	26,9
60	0.25	80,0	11,4	15,6
140	0.11	67,4	9,6	6,0
200	0.075	19,3	2,7	3,3
Pan		22,4	3,2	0,1
Total		703,2	99,9	



D_{10}:	0,1881	C_u:	15,291
D_{30}:	0,598	C_c:	0,661
D_{60}:	2,8755		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

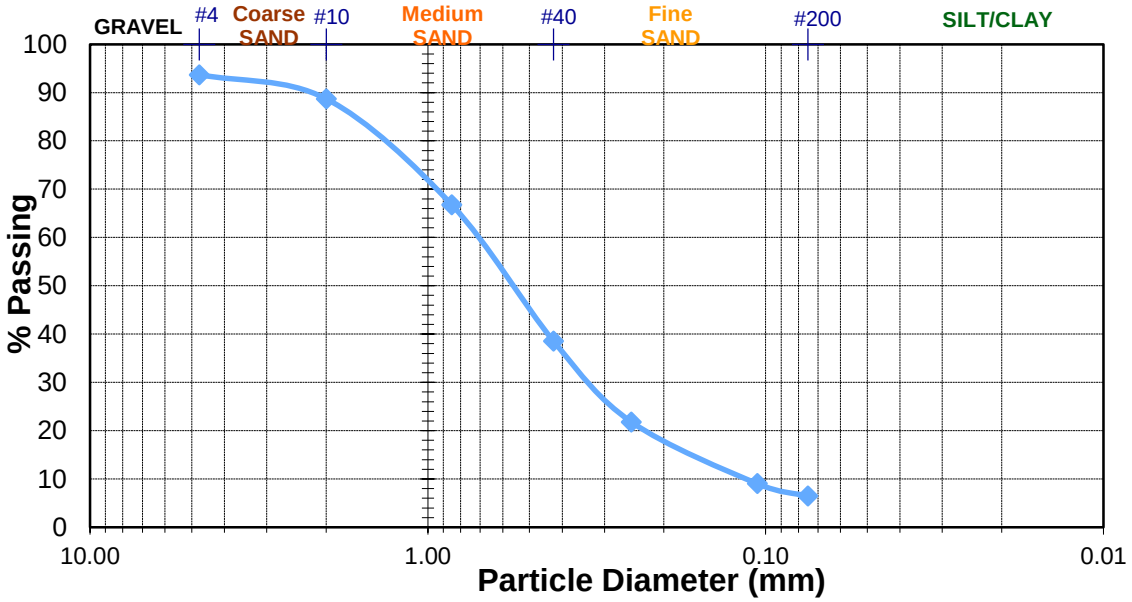
Fecha de toma de muestra: 29 de octubre del 2014

MUESTRA N° 23		**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SW-SM Arenas con limos, bien gradada.
X	**Y**	
562311	**222625**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 212,60 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	13,38	6,29	93,71
10	2.00	10,66	5,01	88,69
20	0.85	46,59	21,91	66,78
40	0.43	59,96	28,20	38,57
60	0.25	35,60	16,75	21,83
140	0.11	27,16	12,78	9,05
200	0.075	5,47	2,57	6,48
Pan		13,1	6,14	0,34
Total		211,9	99,7	



D_{10}:	0,118	C_u:	6,387
D_{30}:	0,3723	C_c:	1,558
D_{60}:	0,7538		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 29 de octubre del 2014.

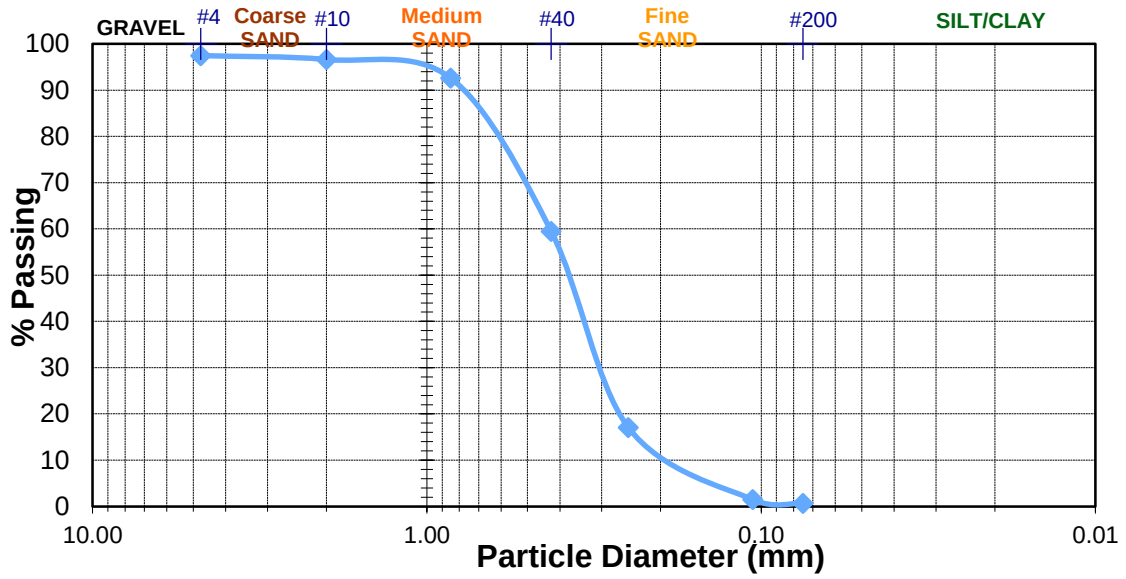
MUESTRA N° 24	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.

COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SP Arenas pobremente gradada.
X	Y	
562422	222538	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 787,6 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	20,0	2,5	97,5
10	2.00	6,7	0,9	96,6
20	0.85	31,6	4,0	92,6
40	0.43	261,0	33,1	59,5
60	0.25	333,8	42,4	17,1
140	0.11	122,8	15,6	1,5
200	0.075	6,4	0,8	0,7
Pan		4,7	0,6	0,1
Total		787,0	99,9	



D_{10}:	0,1746	C_u:	3,307
D_{30}:	0,3357	C_c:	1,118
D_{60}:	0,5774		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

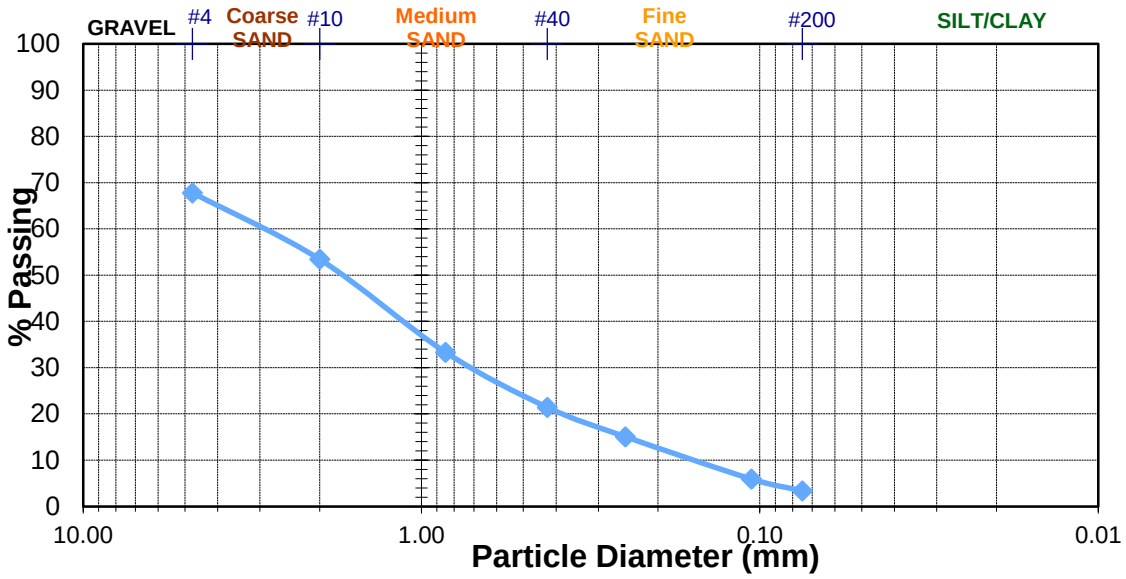
Fecha de toma de muestra: 29 de octubre del 2014.

MUESTRA N° 25		**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS		**USCS clasificación del suelo:** SP Arena pobremente gradada con grava.
X	**Y**	
562544	**222706**	

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 467 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	150,1	32,2	67,8
10	2.00	67,0	14,4	53,4
20	0.85	93,6	20,1	33,3
40	0.43	55,5	11,9	21,4
60	0.25	29,6	6,4	15,1
140	0.11	42,7	9,2	5,9
200	0.075	11,8	2,5	3,4
Pan		14,8	3,2	0,2
Total		465,1	99,8	



D_{10}:	0,2157	C_u:	15,135
D_{30}:	0,751	C_c:	0,801
D_{60}:	3,2647		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra: 29 de octubre del 2014.

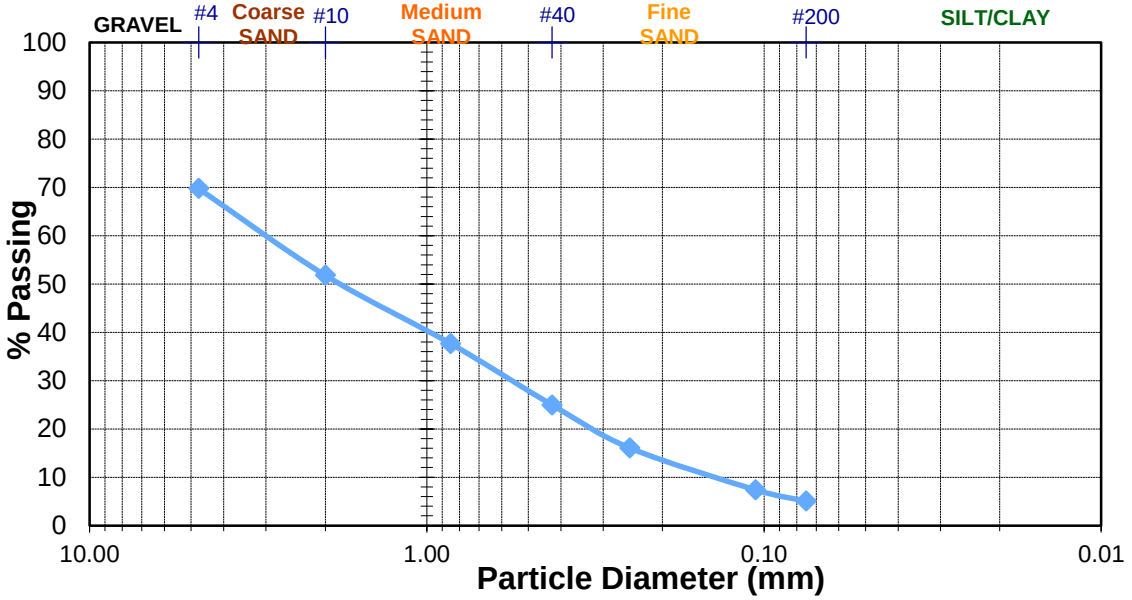
MUESTRA N° 26	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP-SM Arena pobremente gradada con limos y grava.

X	Y
562702	222622

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 638 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	192,7	30,2	69,8
10	2.00	114,7	18,0	51,8
20	0.85	90,2	14,1	37,7
40	0.43	81,1	12,7	25,0
60	0.25	56,8	8,9	16,1
140	0.11	55,3	8,7	7,4
200	0.075	15,0	2,4	5,0
Pan		23,8	3,7	1,3
Total		629,6	98,7	



D_{10}:	0,1691	C_u:	19,259
D_{30}:	0,6538	C_c:	0,777
D_{60}:	3,2561		

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

Fecha de toma de muestra:

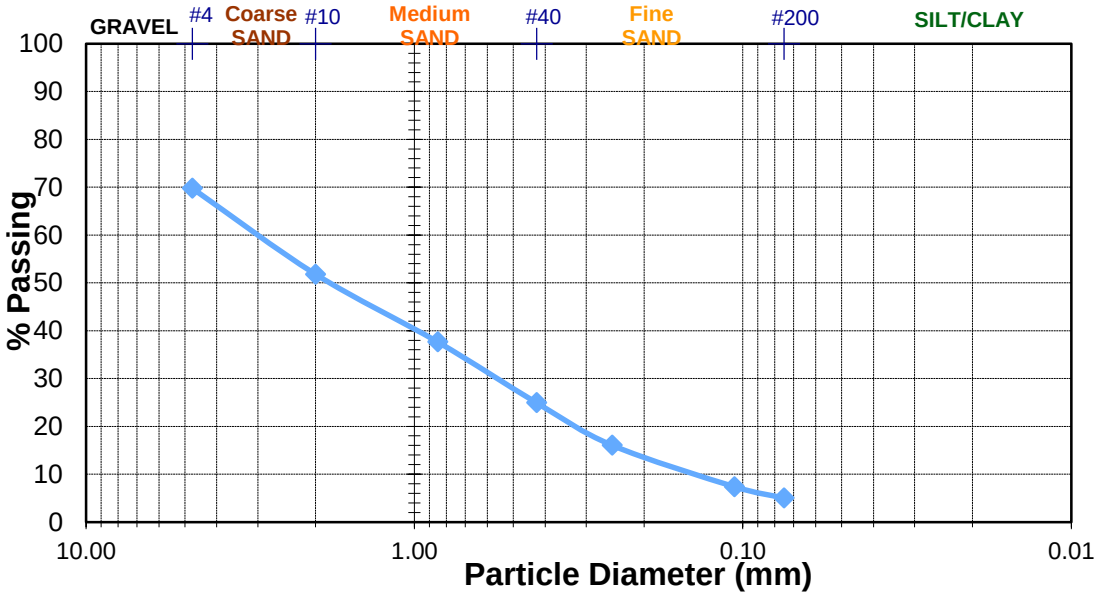
MUESTRA N° 27	**UBICACIÓN:** Cráter central, volcán Turrialba.
COORDENADAS	**USCS clasificación del suelo:** SP-SM. Arena pobremente gradada con limos y grava.

X	**Y**
562447	**223230**

Resultados de Análisis Granulométricos

Peso de la muestra en seco: 700,5 g

Número de	Diámetro	Suelo retenido	Suelo Retenido	Suelo pasando
4	4.75	201,8	28,8	71,2
10	2.00	135,0	19,3	51,9
20	0.85	98,3	14,0	37,9
40	0.43	88,9	12,7	25,2
60	0.25	54,6	7,8	17,4
140	0.11	63,2	9,0	8,4
200	0.075	22,0	3,1	5,2
Pan		30,6	4,4	0,9
Total		694,4	99,1	



D_{10}:	0,1463	C_u:	21,579		
D_{30}:	0,6438	C_c:	0,897		
D_{60}:	3,1572				

ANEXO 13: LÍMITES DE ATTERBERG, VOLCÁN TURRIALBA.

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA
DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO	
MUESTRA N° 1	**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba
COORDENADAS	Plasticidad: Baja Suelo: SM
X / **Y**	
562802 / **222956**	

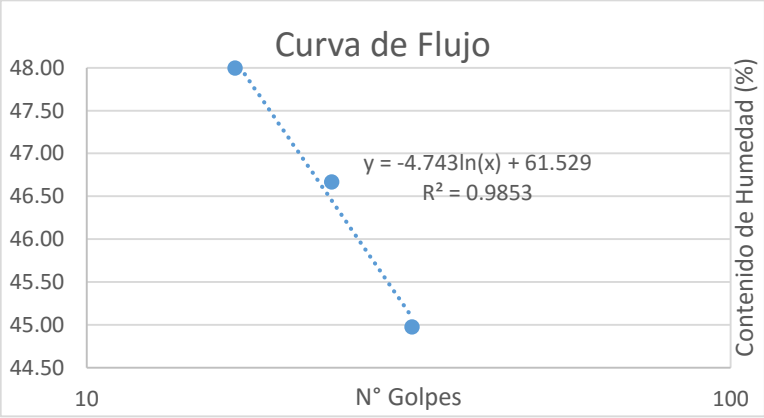
Resultados de Límites de Atterberg

Determinación de límite líquido

LATA Nº	A	B	C
Peso suelo húmedo + lata	26,900	28,700	26,700
Peso suelo seco + lata	24,170	25,200	23,230
Peso de lata	18,100	17,700	16,000
Peso de suelo seco	6,070	7,500	7,230
Peso de agua	8,800	11,000	10,700
Contenido de Humedad %	45,39	46,45	48,09
Número de Golpes N	32	24	17

Determinación de límite plástico

LATA Nº	D	E
Peso suelo húmedo + lata	23,900	24,200
Peso suelo seco + lata	22,150	22,420
Peso de lata	17,800	18,100
Peso de suelo seco	4,350	4,320
Peso de agua	6,100	6,100
Contenido de Humedad %	40,230	41,204



Límite Líquido:	46,3
Límite Plástico:	40,7
Índice de Plasticidad:	5,6

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

MUESTRA N° 7		**UBICACIÓN:** Cráter noreste, volcán Turrialba
COORDENADAS		Plasticidad: Baja Suelo: SM
X	**Y**	
562773	**223072**	

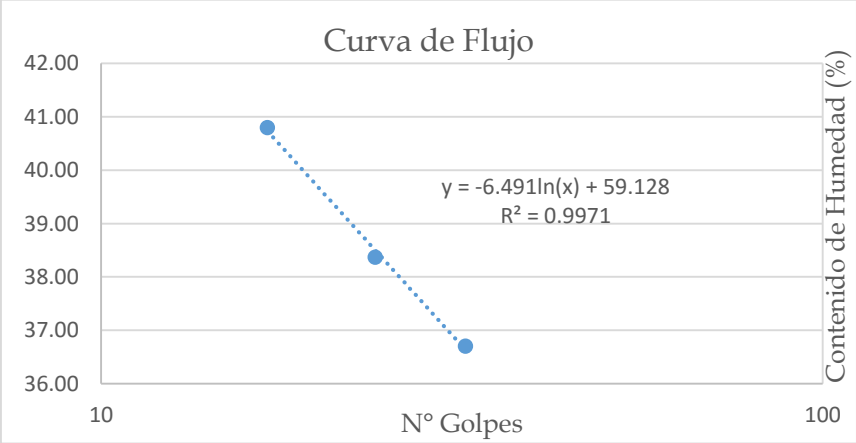
Resultados de Límites de Atterberg

Determinación de límite líquido

LATA Nº	A	B	C
Peso suelo húmedo + lata	15,050	19,450	17,500
Peso suelo seco + lata	12,870	15,920	14,420
Peso de lata	6,930	6,720	6,870
Peso de suelo seco	5,940	9,200	7,550
Peso de agua	8,120	12,730	10,630
Contenido de Humedad %	36,6	38,5	40,74
Número de Golpes N	32	24	17

Determinación de límite plástico

LATA Nº	D	E
Peso suelo húmedo + lata	13,400	12,960
Peso suelo seco + lata	11,780	11,370
Peso de lata	7,030	6,760
Peso de suelo seco	4,750	4,610
Peso de agua	6,370	6,200
Contenido de Humedad %	34,105	34,490



Límite Líquido:	38,2
Límite Plástico:	34,3
Índice de Plasticidad:	3,9

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	MATERIALES DE LA CIMA VOLCÁN TURRIALBA

DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL CAMPO

MUESTRA N° 26		UBICACIÓN:
COORDENADAS		Plasticidad: Baja Suelo: SP-SM
X	Y	
562702	222622	

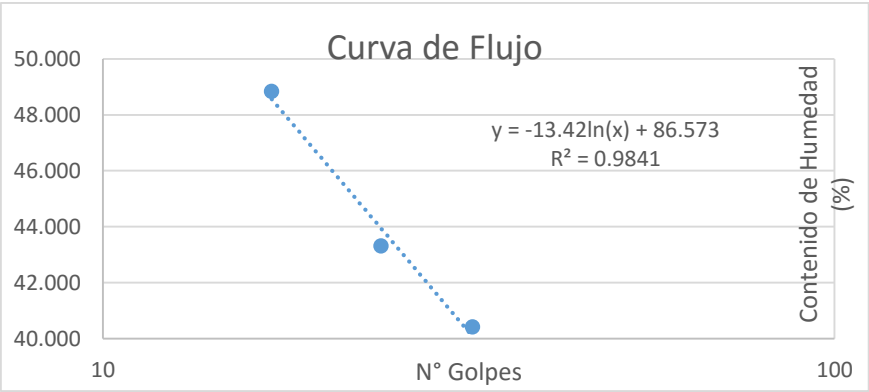
Resultados de Límites de Atterberg

Determinación de límite líquido

LATA Nº	A	B	C
Peso suelo húmedo + lata	20,740	21,400	21,540
Peso suelo seco + lata	18,800	19,100	19,000
Peso de lata	14,000	13,790	13,800
Peso de suelo seco	4,800	5,310	5,200
Peso de agua	6,740	7,610	7,740
Contenido de Humedad %	40,06	43,92	48,55
Número de Golpes N	32	24	17

Determinación de límite plástico

LATA Nº	D	E
Peso suelo húmedo + lata	13,400	12,960
Peso suelo seco + lata	11,780	11,370
Peso de lata	7,030	6,760
Peso de suelo seco	4,750	4,610
Peso de agua	6,370	6,200
Contenido de Humedad %	34,105	34,490



Límite Líquido:	43,2
Límite Plástico:	34,3
Índice de Plasticidad:	8,9

ANEXO 14: RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO REALIZADO PARA LA CIMA DEL VOLCÁN TURRIALBA, AÑO 2011.

En todos los cuadros, **fc:** Capacidad de Infiltración (mm/d), **I:** Infiltración (0,01%), **CC:** Capacidad de Campo (% y en mm), **PM:** Punto de Marchitez (% y en mm), **PR:** Profundidad de Raíces (mm), **(CC-PM):** Rango de Agua Disponible (% y en mm), **DS:** Densidad de Suelo (g/cm³), **C1:** Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR, **C2:** Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR, **Kp:** Factor por pendiente (0,01%), **Kv:** Factor por vegetación (0,01%), **Kfc:** Factor estimado con base a la prueba de infiltración (0,01%), **P:** Precipitación Media Mensual (mm), **Pi:** Precipitación que infiltra (mm), **ESC:** Escorrentía Superficial (mm), **ETP:** Evapotranspiración Potencial (mm), **ETR:** Evapotranspiración Real (mm), **HSi:** Humedad de Suelo Inicial (mm), **HD:** Humedad Disponible (mm), **HSf:** Humedad de Suelo Final (mm), **DCC:** Déficit de Capacidad de Campo (mm), **Rp:** Recarga Potencial (mm), **Ret:** Retención de lluvia (mm).

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2011.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 1, CRÁTER SUROESTE VOLCÁN TURRIALBA.*
ÁREA: *75223,58 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	43312,2	**Ds**	1,65	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	17,32	20,00
Kfc	1	**PM**	13,28	15,34
I	1	**(CC-PM)**	4,04	4,67
N° mes con que se inicia Hsi				3

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	455,3	167,5	83,6	57	244,1	149,7	219,8	128,2	212,8	547,1	593,8	774,5	3633,40
Ret	54,64	20,10	10,03	6,84	29,29	17,96	26,38	15,38	25,54	65,65	71,26	92,94	436,01
Pi	400,66	147,4	73,57	50,16	214,81	131,74	193,42	112,82	187,26	481,45	522,54	681,56	3197,39
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	93,15	84,90	96,82	102,45	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1182,05
HSi	20,00	20,00	20,00	20,00	18,94	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	405,33	152,0	78,23	54,83	218,41	136,40	198,09	117,48	191,93	486,11	527,21	686,23	
ETR	93,15	84,90	48,41	51,22	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1082,41
HSf	20,00	20,00	20,00	18,94	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
DCC	0,00	0,00	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	307,51	62,50	25,15	0,00	104,69	26,87	89,05	8,61	87,80	383,20	430,09	589,50	2114,98

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2011.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 2, CRÁTER CENTRAL VOLCÁN TURRIALBA.*
ÁREA: *102186 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	43312,2	**Ds**	1,65	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	17,32	20,00
Kfc	1	**PM**	13,28	15,34
I	1	**(CC-PM)**	4,04	4,67
N° mes con que se inicia Hsi				3

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	455,3	167,5	83,6	57	244,1	149,7	219,8	128,2	212,8	547,1	593,8	774,5	3633,40
Ret	54,64	20,10	10,03	6,84	29,29	17,96	26,38	15,38	25,54	65,65	71,26	92,94	436,01
Pi	400,66	147,4	73,57	50,16	214,81	131,74	193,42	112,82	187,26	481,45	522,54	681,56	3197,39
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	93,15	84,90	96,82	102,45	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1182,05
HSi	20,00	20,00	20,00	20,00	18,94	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	405,33	152,0	78,23	54,83	218,41	136,40	198,09	117,48	191,93	486,11	527,21	686,23	
ETR	93,15	84,90	48,41	51,22	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1082,41
HSf	20,00	20,00	20,00	18,94	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
DCC	0,00	0,00	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	307,51	62,50	25,15	0,00	104,69	26,87	89,05	8,61	87,80	383,20	430,09	589,50	2114,98

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2011.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 3, CRÁTER CENTRAL VOLCÁN TURRIALBA.*
ÁREA: *310294,9 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	34502,82	**Ds**	1,59	
Kp	0,06	**Pr**	100	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	18,42	29,29
Kfc	1	**PM**	13,78	21,91
I	1	**(CC-PM)**	4,64	7,38
N° mes con que se inicia Hsi				3

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	455,3	167,5	83,6	57	244,1	149,7	219,8	128,2	212,8	547,1	593,8	774,5	3633,40
Ret	54,64	20,10	10,03	6,84	29,29	17,96	26,38	15,38	25,54	65,65	71,26	92,94	436,01
Pi	400,66	147,4	73,57	50,16	214,81	131,74	193,42	112,82	187,26	481,45	522,54	681,56	3197,39
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	93,15	84,90	96,82	102,45	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1182,05
HSi	29,29	29,29	29,29	29,29	28,22	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	408,04	154,7	80,94	57,54	221,12	139,11	200,80	120,19	194,64	488,83	529,92	688,94	
ETR	93,15	84,90	48,41	51,22	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1082,41
HSf	29,29	29,29	29,29	28,22	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	
DCC	0,00	0,00	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	307,51	62,50	25,15	0,00	104,69	26,87	89,05	8,61	87,80	383,20	430,09	589,50	2114,97

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2011.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 4, CRÁTER NORESTE VOLCÁN TURRIALBA.*
ÁREA: *184803,12 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	7731,73	**Ds**	1,37	
Kp	0,06	**Pr**	100	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	22,45	30,76
Kfc	1	**PM**	15,89	21,77
I	1	**(CC-PM)**	6,56	8,99
N° mes con que se inicia Hsi				3

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	455,3	167,5	83,6	57	244,1	149,7	219,8	128,2	212,8	547,1	593,8	774,5	3633,40
Ret	54,64	20,10	10,03	6,84	29,29	17,96	26,38	15,38	25,54	65,65	71,26	92,94	436,01
Pi	400,66	147,4	73,57	50,16	214,81	131,74	193,42	112,82	187,26	481,45	522,54	681,56	3197,39
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	93,15	84,90	96,82	102,45	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1182,05
HSi	30,76	30,76	30,76	30,76	29,69	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	409,65	156,3	82,55	59,15	222,73	140,72	202,41	121,80	196,25	490,44	531,53	690,55	
ETR	93,15	84,90	48,41	51,22	109,05	104,87	104,37	104,21	99,46	98,25	92,45	92,06	1082,41
HSf	30,76	30,76	30,76	29,69	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	
DCC	0,00	0,00	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	307,51	62,50	25,15	0,00	104,69	26,87	89,05	8,61	87,80	383,20	430,09	589,50	2114,97

ANEXO 15: RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO REALIZADO PARA EL VOLCÁN TURRIALBA, AÑO 2014.

En todos los cuadros, **fc:** Capacidad de Infiltración (mm/d), **I:** Infiltración (0,01%), **CC:** Capacidad de Campo (% y en mm), **PM:** Punto de Marchitez (% y en mm), **PR:** Profundidad de Raíces (mm), **(CC-PM):** Rango de Agua Disponible (% y en mm), **DS:** Densidad de Suelo (g/cm³), **C1:** Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR, **C2:** Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR, **Kp:** Factor por pendiente (0,01%), **Kv:** Factor por vegetación (0,01%), **Kfc:** Factor estimado con base a la prueba de infiltración (0,01%), **P:** Precipitación Media Mensual (mm), **Pi:** Precipitación que infiltra (mm), **ESC:** Escorrentía Superficial (mm), **ETP:** Evapotranspiración Potencial (mm), **ETR:** Evapotranspiración Real (mm), **HSi:** Humedad de Suelo Inicial (mm), **HD:** Humedad Disponible (mm), **HSf:** Humedad de Suelo Final (mm), **DCC:** Déficit de Capacidad de Campo (mm), **Rp:** Recarga Potencial (mm), **Ret:** Retención de lluvia (mm).

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS: *ÁREA 1, CRÁTER SUROESTE VOLCÁN TURRIALBA.*
ÁREA: *75223,58 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	43312,2	**Ds**	1,65	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	17,32	20,00
Kfc	1	**PM**	13,28	15,34
I	1	**(CC-PM)**	4,04	4,67
N° mes con que se inicia Hsi				2

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	121,60	55,35	64,40	90,50	121,50	297,20	424,20	155,60	216,60	222,60	124,70	208,20	2102,45
Ret	14,59	6,64	7,73	10,86	14,58	35,66	50,90	18,67	25,99	26,71	14,96	24,98	252,29
Pi	107,01	48,71	56,67	79,64	106,92	261,54	373,30	136,93	190,61	195,89	109,74	183,22	1850,16
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	96,15	90,40	104,21	103,60	111,08	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	1188,89
HSi	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	111,67	53,37	61,34	84,31	111,59	266,20	377,96	141,59	195,27	200,55	114,40	187,88	
ETR	96,15	45,20	52,11	51,80	61,57	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	990,27
HSf	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
DCC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	**10,86**	**3,50**	**4,57**	**27,84**	**45,35**	**155,48**	**267,30**	**33,12**	**90,77**	**94,19**	**23,47**	**103,45**	**859,88**

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 2, CRÁTER CENTRAL VOLCÁN TURRIALBA.*
ÁREA: *102186 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	43312,2	**Ds**	1,65	
Kp	0,06	**Pr**	70	
Kv	0,09		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	17,32	20,00
Kfc	1	**PM**	13,28	15,34
I	1	**(CC-PM)**	4,04	4,67
° mes con que se inicia H			2	

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	121,60	55,35	64,40	90,50	121,50	297,20	424,20	155,60	216,60	222,60	124,70	208,20	2102,45
Ret	14,59	6,64	7,73	10,86	14,58	35,66	50,90	18,67	25,99	26,71	14,96	24,98	252,29
Pi	107,01	48,71	56,67	79,64	106,92	261,54	373,30	136,93	190,61	195,89	109,74	183,22	1850,16
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	96,15	90,40	104,21	103,60	111,08	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	1188,89
HSi	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	111,67	53,37	61,34	84,31	111,59	266,20	377,96	141,59	195,27	200,55	114,40	187,88	
ETR	96,15	45,20	52,11	51,80	61,57	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	990,27
HSf	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
DCC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	**10,86**	**3,50**	**4,57**	**27,84**	**45,35**	**155,48**	**267,30**	**33,12**	**90,77**	**94,19**	**23,47**	**103,45**	**859,88**

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 3, CRÁTER CENTRAL VOLCÁN TURRIALBA.*
ÁREA: *310294,9 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	34502,82	**Ds**	1,59	
Kp	0,06	**Pr**	100	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	18,42	29,29
Kfc	1	**PM**	13,78	21,91
I	1	**(CC-PM)**	4,64	7,38
N° mes con que se inicia Hsi				

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	121,60	55,35	64,40	90,50	121,50	297,20	424,20	155,60	216,60	222,60	124,70	208,20	2102,45
Ret	14,59	6,64	7,73	10,86	14,58	35,66	50,90	18,67	25,99	26,71	14,96	24,98	252,29
Pi	107,01	48,71	56,67	79,64	106,92	261,54	373,30	136,93	190,61	195,89	109,74	183,22	1850,16
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	96,15	90,40	104,21	103,60	111,08	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	1188,89
HSi	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	114,39	56,08	64,05	87,02	114,30	268,91	380,67	144,31	197,99	203,27	117,11	190,59	
ETR	96,15	45,20	52,11	51,80	79,76	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	1008,47
HSf	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	29,29	
DCC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Rp	10,86	3,50	4,57	27,84	27,16	155,48	267,30	33,12	90,77	94,19	23,47	103,45	841,68

BALANCE HÍDRICO

PERIODO DE BALANCE: *ENERO – DICIEMBRE 2014.*
SECTOR DE ANÁLISIS **:** *ÁREA 4, CRÁTER NORESTE VOLCÁN TURRIALBA.*
TEXTURA PROMEDIO DEL SUELO *:*
ÁREA: *184803,12 m²*

VARIABLES DETERMINADAS				
fc	7623,09	**Ds**	1,37	
Kp	0,06	**Pr**	100	
Kv	0,18		**(%)**	**(mm)**
Cfo	0,12	**CC**	22,45	30,76
Kfc	1	**PM**	15,89	21,77
I	1	**(CC-PM)**	6,56	8,99
N° mes con que se inicia Hsi				2

P	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P	121,60	55,35	64,40	90,50	121,50	297,20	424,20	155,60	216,60	222,60	124,70	208,20	2102,45
Ret	14,59	6,64	7,73	10,86	14,58	35,66	50,90	18,67	25,99	26,71	14,96	24,98	252,29
Pi	107,01	48,71	56,67	79,64	106,92	261,54	373,30	136,93	190,61	195,89	109,74	183,22	1850,16
ESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP	96,15	90,40	104,21	103,60	111,08	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	1188,89
HSi	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
C2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,54	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
HD	116,00	57,69	65,66	88,63	115,91	270,52	382,28	145,92	199,60	204,88	118,72	192,20	
ETR	96,15	45,20	52,11	51,80	85,37	106,06	106,00	103,81	99,84	101,70	86,27	79,77	1014,08
HSf	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	30,76	
DCC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
PRp	**10,86**	**3,50**	**4,57**	**27,84**	**21,55**	**155,48**	**267,30**	**33,12**	**90,77**	**94,19**	**23,47**	**103,45**	**836,07**
NR	0,00	45,20	52,11	51,80	25,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	174,81

APENDICE 1

Limnology
DOI 10.1007/s10201-011-0343-7

RESEARCH PAPER

A photographic method for detailing the morphology of the floor of a dynamic crater lake: the El Chichón case (Chiapas, Mexico)

Dmitri Rouwet

Received: 2 September 2010 / Accepted: 5 January 2011
© The Japanese Society of Limnology 2011

Abstract The active volcano El Chichón (Chiapas, Mexico) hosts a shallow acidic crater lake. During the period 2001–2007, 26 photographs of the crater lake were taken from the same spot at the eastern crater rim, ~160 m above the crater floor. The size of the lake was extremely variable. Using a GPS track from around the lake shore as a reference, 26 digitized lake outlines were corrected simultaneously for the perspective angle. The corrected lake outlines were superposed, leading to a "morphological map" of a large section of the lake bottom. This map provides insight into the erosive–sedimentary regime of the lake floor. The inner section of the lake is more stable due to the precipitation of sealing clays. This is probably one of the reasons why the El Chichón crater lake has never disappeared during the past 28 years. The sealing clays at the lake bottom can be considered the superficial analog of impermeable clay caps at the depths of hydrothermal systems. The photographic procedure presented here may be useful for other limnological and (volcanic) lake studies aimed at describing lake morphology, and for eventually deducing the surface area and volume of the lake.

Keywords El Chichón volcano · Crater lake · Photographic method · Geomorphology

Introduction

Approximately 60 active volcanoes around the world host a crater lake (Delmelle and Bernard 2000). Such crater lakes are often filled with hypersaline acidic brines, which are considered to be contemporaneous analogs of epithermal ore-depositing fluids (Brantley et al. 1987; Hedenquist et al. 1992; Hedenquist and Lowenstern 1994). The lake waters owe their acidity to the absorption of magmatic gases (HCl, SO_2) (Varekamp et al. 2000). Intense rock dissolution in the deeper hydrothermal system connected to the lake add cations to the lake water. In this way, crater lakes preserve possible changes in the degassing and fluid regime of a volcano, and are thus ideal targets for volcanic surveillance (Giggenbach 1974; Takano 1987; Christenson 2000). Many studies have focused on mass, chemical, energy and isotopic balances; similar approaches lead to different results depending on the particular dynamics and activity state of each crater lake (Brown et al. 1989; Hurst et al. 1991; Ohba et al. 1994, 2000; Oppenheimer 1997; Varekamp 2003; Rouwet et al. 2004, 2008; Taran and Rouwet 2007, 2008).

The first step in limnological and crater lake research is often to describe the morphology of the lake basin (depth, surface area and volume), principally based on depth surveys (Christenson 1994; Ohba et al. 1994; Haberyan et al. 2003; Rouwet et al. 2004; Anzidei et al. 2008; Tassi et al. 2009) and orthophotographic methods (e.g., Madonia et al. 2006; Aiuppa et al. 2007). Most crater lakes are deep and fill basins or entire craters with steep or nearly vertical walls; lake surfaces mostly remain rather stable, while vertical variations can be extreme (e.g., the Poás, Irazú, Santa Ana, Aso volcanoes) (Bernard et al. 2004; Mora 2005; Miyabuchi and Terada 2009; Ohsawa et al. 2010). Acoustic sounding systems along horizontal transects on lake surfaces have been applied to visualize the bottom profiles of crater lakes (Martini et al. 1994; Takano et al. 2004; Mazot 2005; Mazot and Solikhin 2008). This technique has the advantage that degassing spots through the

D. Rouwet (✉)
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, 153, 90146 Palermo, Italy
e-mail: dmitrirouwet@gmail.com; d.rouwet@pa.ingv.it

Published online: 28 January 2011

lake bottom can be located exactly, although the same noisy signals can inhibit attempts to detail the shape of the lake bottom (Caudron and Bernard 2010; Christenson et al. 2010). Spaceborne altimetry and GPS measurements are useful for providing vertical geodetic information for oceans and large lakes, but have not yet been applied to crater lakes (Morris and Gill 1994; Jekeli and Dumrongchai 2003). Though it has the potential to estimate crater lake surface areas from space by satellite remote sensing methods (e.g., ASTER), this application has only previously been used to deduce thermal radiance from crater lake surfaces (Galindo et al. 2008; Trunk and Bernard 2008; Zlotnicki et al. 2008).

This study introduces an alternative photographic procedure that provides a "morphological map" of a large section of the El Chichón crater lake bottom. Although vertical lake level variations cannot be quantified with this method, qualitative insights into the erosive and sedimentary processes at the lake bottom are possible. A model of the history of the El Chichón crater lake basin is proposed. The main aim of this study is to demonstrate the usefulness of this simple photographic method for describing the morphology and, eventually, estimating the surface areas and volumes of other (crater) lakes.

The El Chichón crater lake and its dynamics

The El Chichón crater lake (17°21′40″N–93°13′48″W; ~860 m a.s.l., Chiapas, Mexico) (Fig. 1a, b) formed rapidly following the March–April 1982 Plinian eruptions through groundwater incursion and direct rainfall; the water filled four connected explosion pit craters (April 1982 photograph in Fig. 2). The initially magmatic crater lake (pH ~0.5, Cl ~24,000 mg/l, TDS ~34,000 mg/l, and T ~55°C; Casadevall et al. 1984) converted into a hydrothermal-dominated system (pH ~1.8–2.5, TDS <3,000 mg/l, and $T < 42$°C; Taran et al. 1998) (1988 photograph in Fig. 2). Despite the fact that the eruptions breached the former hydrothermal system, leaving a 1-km wide 200-m deep crater, there is currently no clear evidence for the presence of a brecciated diatreme beneath the crater floor (Jutzeler and Varley 2008; Jutzeler et al. 2011). There is great uncertainty over the depth of the 1982 crater lake, though it is presumed that the maximum depth was 120 m, and that the lake has a funnel-shaped morphology (Casadevall et al. 1984). In contrast to most crater lakes, the current El Chichón lake is extremely shallow (maximum depth 3.3 m) (Taran and Varley 1999; Rouwet et al. 2004). Only at the main degassing spots does the lake deepen into funnel-shaped depressions (~6 m) (Fig. 1b) (Rouwet et al. 2008). Due to its flat bottom, small changes in the volume of the lake lead to enormous variations in its surface area. When the water level is low, islands and a peninsula can be distinguished (photograph 14 in Fig. 2).

To my knowledge, the El Chichón crater lake (Fig. 1b) is the best demonstration of the delicate steady-state equilibrium between the input and output of thermal fluids that is required for a crater lake to exist: water residence times are extremely short (<2 months) (Taran and Rouwet 2007, 2008), and the infiltration flux is higher than the direct rainfall input flux (Rouwet et al. 2004). Earlier studies quantified the rainfall, evaporation and infiltration fluxes, and found out that the lake size does not vary seasonally, despite the annual rainfall distribution (total annual rainfall of ~4,000 mm, with the rainy season occurring from June to October) (Rouwet et al. 2008; Taran and Rouwet 2008). Though extremely sensitive, the crater lake has never disappeared since its formation in 1982.

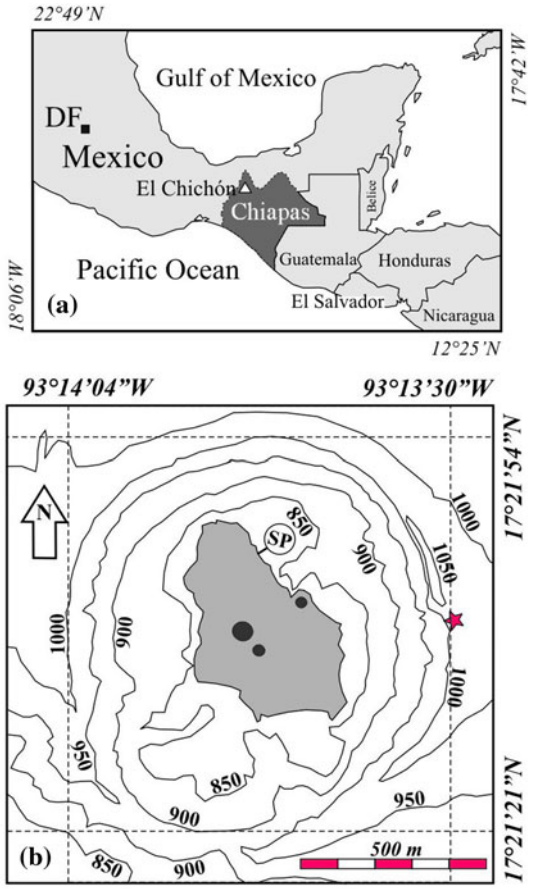


Fig. 1 **a** Location of the El Chichón volcano (*white triangle*). *DF* Mexico City. **b** Topographic map of the El Chichón crater area. The crater lake (shown in *gray*) dates from 3 November 1982 (modified from Casadevall et al. 1984). *Dark gray circles* indicate funnel-shaped depressions with vigorous bubble degassing. The *red star* shows the "mirador" on the eastern crater rim, where all of the photographs were taken. *SP* Soap Pool boiling spring field (Rouwet et al. 2008)

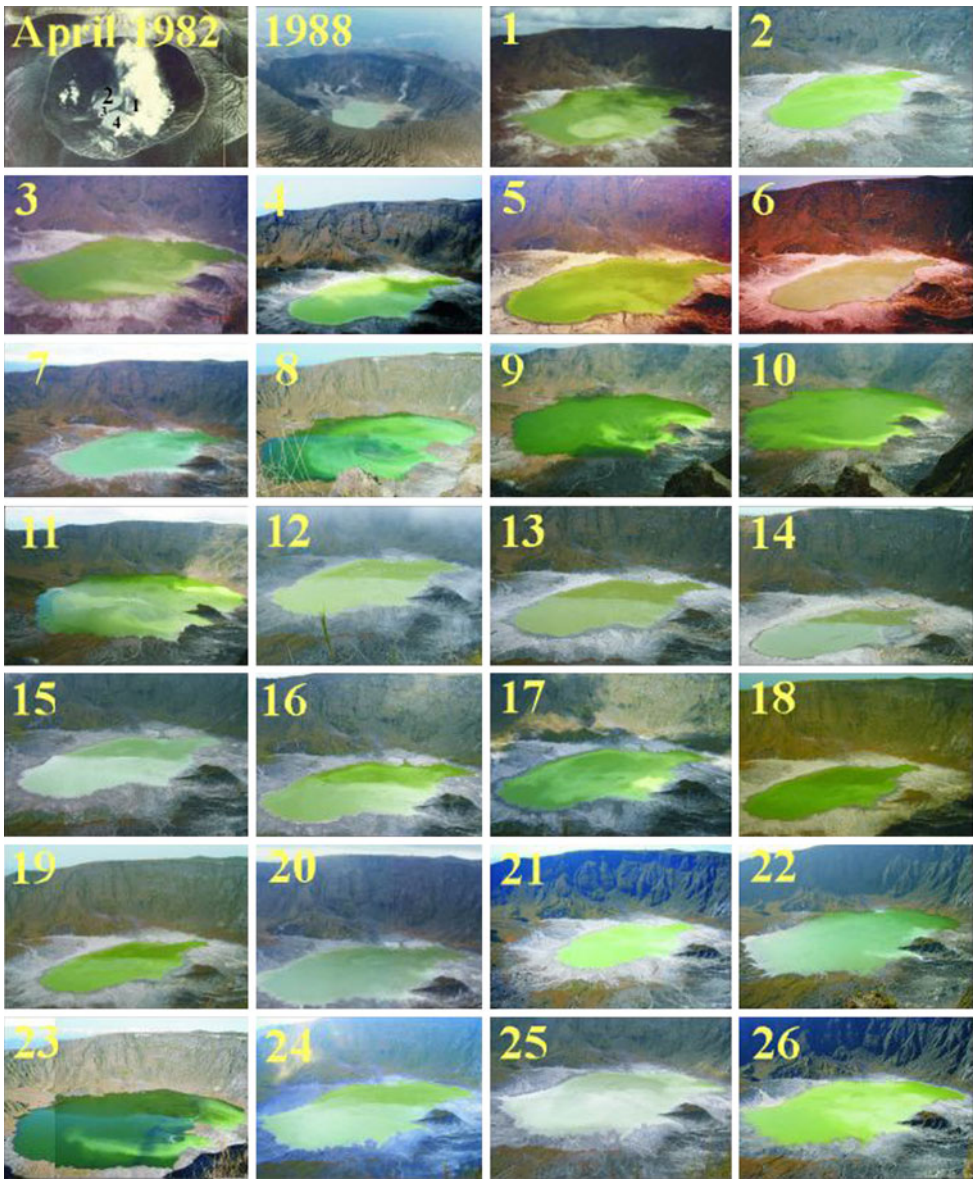


Fig. 2 Twenty-six selected photographs of the El Chichón crater lake collected during the period 2001–2007. See Table 1 for corresponding dates, surface areas, and photographic credits. The *first photograph* shows the four explosion pit crater lakes in April 1982, and the *second photograph* shows the crater lake in 1988 (both photographs are reproduced courtesy of K. Freeland). As both photographs are aerial, it is impossible to apply the same photographic method

Actually, the principal reason why the crater lake has not disappeared during the period 1982–2007 is the periodic input of saline fluids discharged from a near-neutral geyser-like boiling spring from the north side of the lake (called the Soap Pool by Taran et al. 1998), which taps a shallow boiling aquifer beneath the crater floor (Rouwet et al. 2008). Nevertheless, this boiling spring does not always output water; the release of water alternates with the exhalation of vapor. In the latter situation, the crater lake shrinks and becomes less saline.

The fate of the Soap Pool fluid and crater lake water was quantified in earlier studies by applying a mass, chemical, energy and isotopic balance approach (Rouwet et al. 2004, 2008; Taran and Rouwet 2008). The mass balance of the El Chichón crater lake is controlled by the input of meteoric precipitation, the input of water from the Soap Pool boiling spring, and the loss of water through evaporation at the lake surface and seepage through the lake bottom. Rouwet et al. (2004, 2008) found that the changes in lake volume mainly depended on the geyser-like behavior of the Soap Pool boiling spring. Three cycles of a large lake situation were observed up to December 2007, and these coincided with high water discharge (10–30 kg/s) from the Soap Pool spring: January-April 2001, May–June 2004 and March 2007. The maximum lake surface area and volume during these periods were estimated to be 1.8×10^5 m^2 and 6×10^5 m^3, respectively. A medium-sized lake is less frequent (the autumns in 2005, 2006 and 2007); in such cases the surface area is $>8 \times 10^4$ to $<1.2 \times 10^5$ m^2 and the volume $>1.8 \times 10^5$ to $<4 \times 10^5$ m^3. A small lake area seems to be the most common situation, and was observed during the periods 1995–2000, 2002–2003 and 2005–2006;

during such times, the surface area ranges from 4×10^4 to 8×10^4 m^2 and the volume from 5×10^4 to 1.8×10^5 m^3. The minimum surface area and volume were reached in May–June 2005, with values of $<4 \times 10^4$ m^2 and $<4 \times 10^4$ m^3, respectively. In earlier studies of El Chichón crater lake dynamics, a similar but slightly different method to that described below was applied to estimate the lake surface areas reported here. Four bathymetric surveys were needed to obtain empirical equations for estimating the presented lake volumes (for further details on the crater lake dynamics, see Rouwet et al. 2004, 2008, 2009; Taran and Rouwet 2008).

The photographic method

During the observation period (2001–2007), 26 photographs of the crater lake were selected and subjected to the following photographic procedure (Table 1; Fig. 2). More pictures were originally collected during the study period, but the selection is based on the appearance of three fixed points inside the crater area, which are later used as a reference. For some of the collected pictures, at least one of these three fixed points fell out of the range of view of the photograph (e.g., January–April 2001), and were thus omitted during the procedure. The average frequency of photograph collection was every ~3 months, though it varied from 4 days to ~10 months (Table 1).

Table 1 Dates that 26 selected photographs were taken (from the same spot at the eastern crater rim)

No.	Date	No. of days	Photographer
1	5/7/2001	–	1
2	5/4/2002	274	2
3	29/4/2002	24	1
4	3/3/2003	308	3
5	3/4/2003	31	1
6	1/5/2003	28	4
7	10/11/2003	193	1
8	1/3/2004	112	5
9	15/3/2004	14	2
10	10/4/2004	26	2
11	15/5/2004	35	2
12	10/3/2005	299	1
13	27/3/2005	17	2
14	5/6/2005	69	2
15	25/6/2005	21	2
16	17/7/2005	22	2
17	21/7/2005	4	2
18	12/9/2005	53	6
19	25/9/2005	13	6
20	6/12/2005	72	1
21	22/2/2006	78	4
22	19/11/2006	270	1
23	25/3/2007	126	1
24	12/9/2007	171	7
25	19/10/2007	32	8
26	20/12/2007	67	9

No. of days number of days between two photographs

[1] D. Rouwet, [2]K. Freeland, [3]N. Varley, [4]T. Scolamacchia, [5]S. Inguaggiato, [6]J. C. Mora, [7]L. Serrano, [8]M. Jutzeler, [9]A. Mazot

The operations described below are performed using basic graphical software, such as CorelDRAW. Though each photograph was taken from the same spot, at the "mirador" on the eastern crater rim (red star in Fig. 1b), differences in the distortion of the image and the perspective angle among the various photographs are apparent. This is due to the fact that (1) the photographs were taken with different cameras (with different lens focal distances), and (2) the photographers took photographs from slightly different positions.

To perform an accurate comparison between the various observed lake sizes, the differences among the photographs in terms of the distortion of the image and the perspective angle need to be eliminated, and an orthogonal projection of each lake must be obtained. To achieve these goals, I first digitized the lake outline in each photograph (red outline in Fig. 3). To correct for the differences in image distortion and perspective angle, I fixed three points inside the crater on each photograph; these points were morphological features that did not vary with time and are located at almost the same height above the lake surface: (1) the top of the talus of the pyroclastic deposit at the northeast

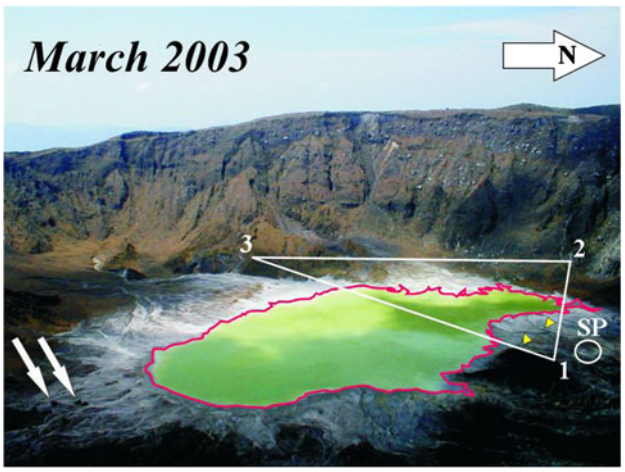


Fig. 3 Digitizing the March 2003 lake outline and the reference triangle connecting three fixed points in the crater area (numbered *1–2–3*). The *white arrows* indicate large blocks on the southeastern part of the crater, which will be used to calculate the error in the photographic method. The *yellow triangles* indicate the channels that discharge the Soap Pool boiling spring. *SP* Soap Pool boiling spring field

coast of the lake, (2) the northwestern fumarole, and (3) the top of a ridge on the southwest coast of the lake (numbered in Fig. 3). Moreover, the reference points were chosen in order to also cover the far end of the lake (2 and 3 in Fig. 3) with respect to the observation point at the crater rim, considering that the perspective error is larger for smaller perspective angles and larger distances from the observed object, in the case of a larger lake. The variable shapes of the triangles formed by connecting the three reference points prove that the distortion and perspective angle are slightly different in each photograph, and thus for each lake outline (Fig. 4a). To correct for the variations in distortion and perspective angle introduced when shooting the photographs, the entire design—the triangle plus the lake outline for each lake separately—is deformed by roto-translation until it fits the March 2003 triangle. As all separate triangles are compared with the same March 2003 triangle, the differences in distortion and the perspective angle should be excluded for each lake outline. Finally, all of the lake outlines are superposed by fitting the triangles (Fig. 4b).

Fig. 4 **a** Selected lake outlines with their coinciding reference triangles that demonstrate the small differences in distortion and perspective angle introduced when shooting the photographs: the three triangles do not perfectly fit. **b** Fitting the triangles to the March 2003 triangle (*red*) by roto-translation while the lake outline is simultaneously transformed. Shown in *red*: 3 March 2003 (the reference outline); in *black*: 4 June 2005 (outline of the smallest lake ever observed); in *blue*: 25 March 2007 (outline of the largest lake ever observed)

During the March 2003 field campaign, a GPS track (Garmin GPSmap 76Cx, horizontal precision of ~10 m) was obtained by walking around the lake along the shore. The GPS track shows a geolocated and scaled view of the crater lake, which was used as a reference (Fig. 5a). All of the lake outlines were deformed simultaneously so that the March 2003 outline fitted as perfectly as possible to the March 2003 GPS track (Fig. 5b). Graphical software packages make it possible to correct for the perspective angle, thus eliminating the distance effect of the far side of the lake (S and W). Therefore, the desired orthogonal and horizontally scaled view of all of the crater lake outlines was obtained, and this can be interpreted as a "morphological map" of the lake bottom (Fig. 6). Although they cannot be quantified with this method, the lake outlines can be considered isohypses, as the elevation of the surface is constant for each observed lake.

The position of the rocks near the eastern shore of the lake remained fixed (white arrows in Fig. 3), and should theoretically coincide for each image after the entire projection procedure (black arrows in Fig. 6). Thus, the distance between the rocks can be used to quantify the error of the photographic method. The estimated error of the roto-translational procedure is ~10 m, which is of the same order as that for the GPS device (~2% of the total length of the largest lake, ~550 m, in March 2007). The error for the outlines of the far side of the lake is slightly larger; however, as all lake outlines underwent the same roto-translational procedure, the error for all outlines is the same, which makes a comparison possible.

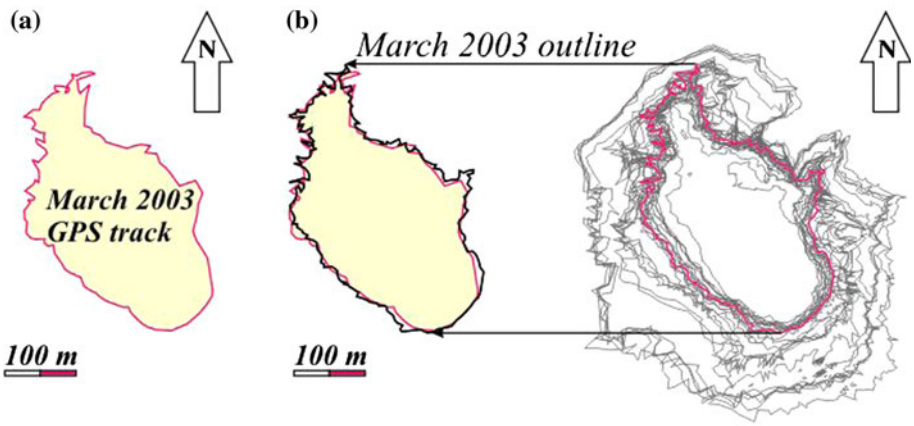


Fig. 5 **a** The March 2003 GPS track obtained by walking around the lake along the lake shore. **b** Fitting the March 2003 lake outline to the March 2003 GPS track by roto-translational and perspective correction operations. All of the lake outlines are deformed equally and simultaneously

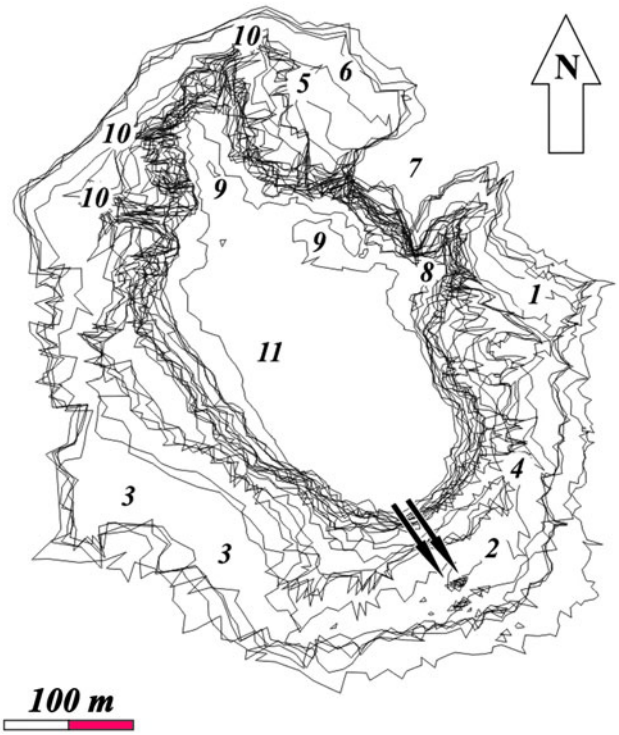


Fig. 6 "Morphological map" of a large section of the bottom of the El Chichón crater lake. The numbers are discussed in "Results". The *black arrows* indicate the large blocks on the east side of the lake. The distance between the *arrows* is a measure of the error of the applied photographic method

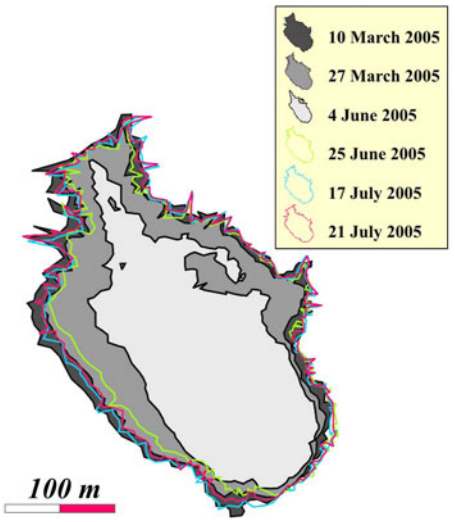


Fig. 7 The spring–summer 2005 shrinking–growing sequence of the crater lake. The shrinking is shown by *gray colors*, and the consequent lake growth is shown by *colored outlines*

Results

Together with field observations, some geomorphological features of the El Chichón crater lake floor can be explained by the "morphological map" (Fig. 6). The northeastern (1 in Fig. 6), southeastern (2) and southwestern (3) sections are extremely flat; this part of the crater floor seems to be covered less frequently by the lake, as a small vertical drop in lake level results in a sudden significant decrease in lake area. However, the eastern and northern sections of the lake floor show dendritic patterns for a few medium-sized lake outlines. In theory, assuming zero error, if the outline of a smaller lake crosses the outline of a larger lake at some point, it implies erosion at the lake bottom (e.g., 4 in Fig. 6); the contrary implies sedimentation. The dendritic patterns probably result from the interplay of erosion and sedimentation induced by superficial meteoric run-off, especially from the eastern side of the crater, as confirmed by field observations during heavy rain events. A less apparent dendric pattern (5) can be seen at the northern section of the lake, coinciding with the inflow channels of fluids originating from the Soap Pool geyser field (6). These channels have remained stable as sinter crusts and oxyhydroxide precipitations have hardened the channel bed (yellow triangles in Fig. 3).

The gap in the outline pattern to the northeast of the lake (7) shows the steep talus of the pyroclastic deposit (see also the first photograph in Fig. 2). Just south of this gap, a semicircular structure is seen (8), corresponding to a strongly bubbling degassing spot inside the lake. The smallest lake ever was observed in May–June 2005, when islands and a peninsula emerged above the lake surface (9 in Fig. 6).

Despite the dependence on the frequency of data gathering, it seems no coincidence that a small lake was more common throughout 2001–2007. The dense concentration of these outlines infers a more morphologically stable section of the lake basin. The branches in the western section (10 in Fig. 6) demonstrate stable inflow channels of entering thermal fluids or meteoric run-off waters. Unfortunately, the lake level never dropped low enough to distinguish the funnel-shaped depressions at major degassing spots in the center of the lake (11). The large lakes of January–April 2001 (excluded from this work due to a lack of fixed reference points in the photograph), 2004 and 2007 cover the same basin, indicating that the lake bottom morphology of the outer sections did not undergo significant modifications.

Discussion

The 2005 shrinking–growing sequence

The spring–summer 2005 shrinking–growing sequence of the crater lake is well documented by the database presented here (Table 1) (Fig. 7). In June 2005, at the end of

the dry season, the lake reached its smallest volume ever (<4 × 10^4 m^3, Rouwet et al. 2009). The 2005 rainy season happened just before the lake would have completely dried out for the first time. In ~50 days (5/6/2005 to 21/7/2005, Table 1), the lake recovered to its most stable basin situation. Figure 7 shows that there was a period of decreasing lake size (gray colors) following by a period of sudden increasing lake size (colored outlines) covering a period of only ~4 months, which physically demonstrates the dynamic character of the El Chichón crater lake. There are three reasons why the El Chichón crater lake seems to be protected from complete disappearance: (1) periodic input of thermal waters from the geyser-like spring (Rouwet et al. 2004, 2008; Taran and Rouwet 2008), (2) contributions from rain water, albeit direct or through superficial run-off, and (3) the lake basin exhibits a more physically stable section during low water levels.

Field observations confirm that the bottom of the outer sections of the lake is covered by more permeable pumiceous sands, while the inner section is covered by clayey sediments. The clays seal the central section of the lake bottom, inhibiting direct seepage. Also, during the lowest water levels (March–September 2005), the lake is bordered by darker clayey sediments, revealing the floor of the sealed and more stable central section of the lake (e.g., photographs 13, 14, 17, 18 and 19 in Fig. 2).

Besides the enhanced seepage of the lake when it is large, this larger surface area results in higher water loss by evaporation (Taran and Rouwet 2008). The 2005 shrinking–growing sequence shows visually how short the residence times of the crater lake water can be at El Chichón (<2 months), as calculated by Taran and Rouwet (2008).

History of the El Chichón crater lake basin

The stable central section of the lake corresponds to the area of the lake shortly after its formation in 1982 (Casadevall et al. 1984). There is great uncertainty about the depth of the lake in November 1982: estimates vary from 40 m (reported in Inbar et al. 2001) to 120 m (Casadevall et al. 1984). The November 1982 lake had a presumed volume of 5 × 10^6 m^3 (Casadevall et al. 1984). The initial lake consisted of four unstable funnel-shaped crater structures bordered by ridges of rock talus. These ridges probably collapsed into the lake during the first rainy season after the 1982 eruptions at El Chichón.

The lake volume during periods with low water levels in 2001–2007 was at least one order of magnitude lower than that of the 1982 lake (5 × 10^4 to 1.8 × 10^5 m^3). Assuming the estimate of the initial lake volume is correct, this implies that at least 4.8 × 10^6 m^3 of rocky material fell into the lake due to mechanical instability (rock fall, flank collapse, sediment wash) during the first year after the 1982 eruption. Casadevall et al. (1984) calculated that approximately 4.5 × 10^5 m^3 of tephra was washed into the lake during the period April–November 1982, while Inbar et al. (2001) estimated that the sediment discharge during the first year after the eruption for the outer flanks of the volcanic edifice was 10^5 m^3/km^2, resulting in a value of ~8 × 10^4 m^3 for the sediment discharge for the crater area (~0.8 km^2) into the lake. These estimates imply that during the period April–November 1982, at least 4 × 10^6 m^3 of rocky material collapsed into the lake due to mechanical instability, filling the initial 120 m deep lake basin up to its present shallow depth. Mills (1992) reports that an even higher volume of 4 × 10^7 m^3 of dry rock collapsed into the 2-km wide 600-m deep Mount Saint Helens caldera (Washington, USA) (~10 times larger than the 1982 El Chichón crater) during the first 8 years after the similar Plinian eruption in May 1980. Topographic changes at the Mount Saint Helens caldera wall were also large during the first 10 years after that eruption, but have declined since then (Obanawa and Matsukura 2008). Based on the numbers for the analogous Mount Saint Helens situation, a massive collapse of 4 × 10^6 m^3 of rock material at El Chichón seems reasonable. Nevertheless, besides minor rock fall and mass movement from the S and SW sector of the El Chichón crater in 1986–1987 (K. Freeland, personal communication), no strong morphological changes that could have affected the morphology of the crater lake basin occurred after the 1982 eruptions. A recent geophysical survey (Jutzeler et al. 2011) demonstrates the absence of a remnant magma body beneath the 1982 crater, which excludes any influence of a possible magmatic system on the crater lake morphology. Based on these facts, it is very probable that the El Chichón crater lake has always been a rather shallow lake since its formation in 1982, undergoing only minor morphological variations due to sediment washing into the lake since then.

Besides this geomorphologically stable lake situation, another process resulted in the physical stability of the lake. The initial crater lake was extremely acidic (pH ~ 0.5) (Casadevall et al. 1984), and thus more aggressive in terms of rock leaching. These initially saline and acidic lake waters were diluted over time (present pH of lake water: ~2.5; Rouwet et al. 2008), which permitted clay minerals to precipitate, sealing the bottom of the current central lake section, inhibiting infiltration and thus enhancing the lake's physical stability. This sealing of the lake bottom by clay minerals may be a surface analog for the creation of impermeable clay caps inside hydrothermal systems, which is probably also the case at shallow depths beneath the El Chichón crater floor. In January 2001, the less acidic lake flooded the outer sections of the lake basin, probably for the first time. The bottom sediments of this section remained practically unaltered until that date, and

thus more permeable. This is probably why the lake is less stable when it is large- to medium-sized (2001, 2004, autumn 2005 and 2006, and 2007), as lake water is flushed out quickly through the more sandy outer section of the lake bottom.

Conclusions

Due to the flat crater floor, small vertical variations in lake level give rise to drastic changes in the surface area of the El Chichón crater lake. This observation forms the basis for a simple photographic method based on 26 selected photographs of the crater lake taken during the period 2001–2007. The superposition of distortion- and perspective-corrected lake outlines, interpreted as isohypses, yields a "morphological map" of the crater lake bottom.

Since the initial mechanical instability of the crater lake basin (April–November 1982), the erosion and sedimentation regimes indicate that there have been only minor morphological variations. Based on the findings of this study, it appears very improbable that the initial lake depth was as high as 120 m. The central section of the crater lake basin is the most stable and probably formed shortly after the crater lake appeared in 1982: fresh rocky material dissolved in the acidic lake water, and, and after the pH of the lake water had increased, this material precipitated as secondary clay minerals, sealing the lake floor. The presence of a sealed central basin is one of the reasons why the El Chichón crater lake is yet to disappear during its 28 years of existence.

It is visually demonstrated using the March-July 2005 shrinking-growing sequence that the residence time of the water in the lake is extremely short (<2 months). On the one hand, shallow lakes with flat lake bottoms are rarely as dynamic as the El Chichón crater lake; on the other hand, crater lakes with highly variable volumes often have funnel-shaped or steep-walled lake basins. In the latter case, relationships between the lake level and stable geomorphological features should be identified in order to deduce equations that will allow lake surface areas and volumes to be estimated. Many (crater) lakes have decades-long photographic records, which can be re-interpreted to describe their dynamics and morphology during that period. Almost all photographs of (crater) lakes are taken from a topographically high level, with a perspective angle. The cheap and simple technique employed in this work could lead to the use of similar approaches to study the morphological evolutions of other (crater) lakes, or to estimate lake surface areas and volumes.

Acknowledgments The author wishes to thank the reviewers and the editor for insightful revision of the manuscript. The author is indebted to K. Freeland, Y. Taran, T. Scolamacchia, J.C. Mora, M. Jutzeler, N. Varley, A. Mazot and L. Serrano for additional photographs, and is grateful to Y. Taran, M. Jutzeler, P. Madonia, J.C. Varekamp, and G. Chiodini for nourishing comments on the early version of this manuscript. Financial support for D.R. during the period 2006–2007 came from *Belgische Stichting Roeping*.

References

Aiuppa A, D'Alessandro W, Gurrieri S, Madonia P, Parello F (2007) Hydrologic and geochemical survey of the lake "Specchio di Venere" (Pantelleria Island, Southern Italy). Environ Geol 53:903–913

Anzidei M, Carapezza ML, Esposito A, Giordano G, Tarchini L, Lelli M (2008) The Albano Maar lake high resolution bathymetry and dissolved CO_2 budget (Colli Albani District, Italy): constraints to hazard evaluation. J Volcanol Geotherm Res 171:258–268

Bernard A, Escobar CD, Mazot A, Gutiérrez RE (2004) The acid volcanic lake of Santa Ana volcano, El Salvador. Geol Soc Am 375:121–133

Brantley SL, Borgia A, Rowe G, Fernández JF, Reynolds JF (1987) Poás volcano crater lake acts as a condenser for acid metal-rich brine. Nature 330:470–472

Brown G, Rymer H, Dowden J, Kapadia P, Stevenson D, Barquero J, Morales LD (1989) Energy budget analysis for Poás crater lake: implications for predicting volcanic activity. Nature 339: 370–373

Casadevall TJ, De la Cruz-Reyna S, Rose WI, Bagley S, Finnegan DL, Zoller WH (1984) Crater lake and post-eruption hydrothermal activity, El Chichón Volcano, Mexico. J Volcanol Geotherm Res 23:169–191

Caudron C, Bernard A (2010) Hydroacoustic quantifications of CO_2 bubbles in volcanic lakes (abstract). In: 7th Workshop on Volcanic Lakes, CVL-IAVCEI, Costa Rica, 10–21 March 2010

Christenson BW (1994) Convection and stratification in Ruapehu crater lake, New Zealand: implications for Lake Nyos-type gas release eruptions. Geochem J 26:185–197

Christenson BW (2000) Geochemistry of fluids associated with the 1995–1996 eruption of Mt. Ruapehu, New Zealand: signatures and processes in the magmatic-hydrothermal system. J Volcanol Geotherm Res 97:1–30

Christenson BW, Mazot A, Britten K (2010) Gas transfer through Ruapehu crater lake: insights gained from a recent water-borne survey. AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 13–17 December 2010, V23A-2388

Delmelle P, Bernard A (2000) Volcanic lakes. In: Encyclopedia of volcanoes. Academic, New York, pp 877–895

Galindo I, Roeder G, López JP (2008) Long term AVHRR observations of surface radiative flux from El Chichón crater lake (1996–2006). J Volcanol Geotherm Res 174:488–493

Giggenbach WF (1974) The chemistry of crater lake, Mt. Ruapehu (New Zealand) during and after the 1971 active period. NZ J Sci 17:33–45

Haberyan KA, Horn SP, Umaña GV (2003) Basic limnology of fifty-one lakes in Costa Rica. Rev Biol Trop 51:107–122

Hedenquist JW, Lowenstern JB (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. Nature 370:519–527

Hedenquist JW, Reyes AG, Simmons SF, Taguchi S (1992) The thermal and geochemical structure of geothermal and epithermal systems: a framework for interpreting fluid inclusion data. Euro J Mineral 4:989–1015

Hurst AW, Bibby HM, Scott BJ, McGuinness MJ (1991) The heat source of Ruapehu crater lake; deductions from the energy and mass balances. J Volcanol Geotherm Res 46:1–20

Inbar M, Reyes Enriquez A, Graniel Graniel JH (2001) Morphological changes and erosion processes following the 1982 eruption of El Chichón volcano, Chiapas, Mexico. Géomorphol Relief Process Environ 3:175–184

Jekeli C, Dumrongchai P (2003) On monitoring a vertical datum with satellite altimetry and water-level gauge data on large lakes. J Geodesy 77:447–453

Jutzeler M, Varley N (2008) Geophysical study of the El Chichón dome complex (Chiapas, Mexico): insights into its structure and alteration processes. In: IAVCEI General Assembly, Reykjavík, Iceland, 18–22 Aug 2008, 2-f P08

Jutzeler M, Varley N, Roach M (2011) Geophysical characterization of hydrothermal systems and intrusive bodies, El Chichón volcano (Mexico). J Geophys Res (in press)

Madonia P, Naselli-Flores L, Parello F, Parlatos B, Viola A (2006) Geological development of a gypsum lake formed at the beginning of the 20th century in central Sicily, Italy: integration of historical data with modern survey techniques. Chem Ecol 22:333–347

Martini M, Giannini L, Prati F, Tassi F, Capaccioni B, Bozzelli P (1994) Chemical characters of crater lakes in the Azores and Italy: the anomaly of Lake Albano. Geochem J 26:173–184

Mazot A (2005) Activité hydrothermale des volcans Kelud et Papandayan (Indonésie) et évaluation des flux de gaz carbonique (Ph.D. thesis). Université Libre de Bruxelles, Belgium

Mazot A, Solikhin A (2008) Evolution du flux de gaz carbonique du lac de cratère du KELUD de 2001 jusqu'à l'éruption de 2007. Liaison Amateurs Volcanol Eur 130:24–31

Mills HH (1992) Post-eruption erosion and deposition in the 1980 crater of Mount St Helens, Washington, determined from digital maps. Earth Surf Process Landforms 17:739–754

Miyabuchi Y, Terada A (2009) Subaqueous geothermal activity revealed by lacustrine sediments of the acidic Nakadake crater lake, Aso Volcano, Japan. J Volcanol Geotherm Res 187:140–145. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.08.001

Mora R (2005) Informe de la actividad de la Cordillera Volcánica Central, Enero 2003–Junio 2004 (internal report). RSN, Costa Rica, pp 1–56

Morris CS, Gill SK (1994) Evaluation of the TOPEX/POSEIDON altimeter system over the Great Lakes. J Geophys Res 99:24527–24539

Obanawa H, Matsukura Y (2008) Cliff retreat and talus development at the caldera wall of Mount Saint Helens: computer simulation using a mathematical model. Geomorphology 97:697–711

Ohba T, Hirabayashi J, Nogami K (1994) Water, heat and chlorine budgets of the crater lake, Yugama at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. Geochem J 26:217–231

Ohba T, Hirabayashi J, Nogami K (2000) D/H and $^{18}O/^{16}O$ ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. J Volcanol Geotherm Res 97:329–346

Ohsawa S, Saito T, Yoshikawa S, Mawatari H, Yamada M, Amita K, Takamatsi N, Sudo Y, Kagiyama T (2010) Color change of lake water at the active crater lake of Aso volcano, Yudamari, Japan: is it in response to change in water quality induced by volcanic activity? Limnology. doi:10.1007/s10201-009-0304-6

Oppenheimer C (1997) Ramifications of the skin effect for crater lake heat budget analysis. J Volcanol Geotherm Res 75:159–165

Rouwet D, Taran Y, Varley N (2004) Dynamics and mass balance of El Chichón crater lake, Mexico. Geofís Int 43:427–434

Rouwet D, Taran Y, Inguaggiato S, Varley N, Santiago SJA (2008) Hydrochemical dynamics of the "lake-spring" system in the crater of El Chichón volcano (Chiapas, Mexico). J Volcanol Geotherm Res 178:237–248

Rouwet D, Bellomo S, Brusca L, Inguaggiato S, Jutzeler M, Mora R, Mazot A, Bernard R, Cassidy M, Taran Y (2009) Major and trace element geochemistry of El Chichón volcano-hydrothermal system (Chiapas, Mexico) in 2006–2007: implications for future geochemical monitoring. Geofís Int 48:55–72

Takano B (1987) Correlation of volcanic activity with sulfur oxyanion speciation in a crater lake. Science 235:1633–1635

Takano B, Suzuki K, Sugimori K, Ohba T, Fazlullin SM, Bernard A, Sumarti S, Sukhyar R, Hirabayashi M (2004) Bathymetric and geochemical investigation of Kawah Ijen crater lake, East Java, Indonesia. J Volcanol Geotherm Res 135:299–329

Taran Y, Rouwet D (2007) Energy-budget and mass balance estimations of the thermal input to El Chichón crater lake, Mexico. Water–Rock Interact 12:947–951

Taran Y, Rouwet D (2008) Estimating thermal inflow to El Chichón crater lake using the chemical and isotope balance approach. J Volcanol Geotherm Res 175:472–481

Taran Y, Varley N (1999) New data about El Chichón crater lake. IAVCEI General Assembly, Jakarta

Taran YA, Fischer TP, Pokrovsky B, Sano Y, Armienta MA, Macías JL (1998) Geochemistry of the volcano-hydrothermal system of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico. Bull Volcanol 60:436–449

Tassi F, Vaselli O, Fernández E, Duarte E, Martínez M, Delgado-Huertas A, Bergamaschi F (2009) Morphological and geochemical features of crater lakes in Costa Rica: an overview. J Limnol 68:193–205

Trunk L, Bernard A (2008) Investigating crater lake warming using ASTER thermal imagery: case studies at Ruapehu, Poás, Kawah Ijen, and Copahué volcanoes. J Volcanol Geotherm Res 178:259–270

Varekamp JC (2003) Lake contamination models for evolution towards steady state. J Limnol 62:67–72

Varekamp JC, Pasternack GB, Rowe GL (2000) Volcanic lake systematics II. Chemical constraints. J Volcanol Geotherm Res 97:161–179

Zlotnicki J, Sasai Y, Toutain JP, Villacorte EU, Bernard A, Sabit JP, Gordon JM Jr, Corpuz EG, Harada M, Punongbayan JT, Hase H, Nagao T (2008) Combined electromagnetic, geochemical and thermal surveys of Taal volcano (Philippines) during the period 2005–2006. Bull Volcanol 71:29–47