

**METODOLOGÍA DEL PROCESO DE ANÁLISIS REQUERIDO EN LA  
INVESTIGACIÓN, DE CARÁCTER NO EXPERIMENTAL, DEL  
COMPORTAMIENTO GEODINÁMICO DE LAS PUZOLANAS, COMO  
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.**

**NATALY QUINTANA RIVERA**

**DIRECTOR**

**PhD. JUAN CARLOS MEDINA CASTRO**



**UNIVERSIDAD MILITAR  
NUEVA GRANADA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., DICIEMBRE DE 2019**

**METODOLOGÍA DEL PROCESO DE ANÁLISIS REQUERIDO EN LA  
INVESTIGACIÓN, DE CARÁCTER NO EXPERIMENTAL, DEL  
COMPORTAMIENTO GEODINÁMICO DE LAS PUZOLANAS, COMO MATERIAL  
DE CONSTRUCCIÓN.**

**NATALY QUINTANA RIVERA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR**

**PhD. JUAN CARLOS MEDINA CASTRO**



**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., DICIEMBRE DE 2019**

**Nota aceptación**

---

---

---

---

---

Firma de tutor

---

Firma de jurado 1

---

Firma de jurado 2

Bogotá D. C., Diciembre de 2019.

## DEDICATORIA

Esta meta se lo dedicó principalmente a Dios quien nos da la salud y la vida, además de brindarme la oportunidad de finalizar este gran logro.

A mis padres, y hermanos, que me brindaron siempre su apoyo incondicional, en momentos difíciles me motivaron a seguir adelante para cumplir mis metas y logros, tanto profesional como personal.

Este logro se lo dedico a ustedes, gracias a mis padres por apoyarme en ser alguien en la vida.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, el agradecimiento con Dios que permitió culminar este gran logro en mi vida, gracias a el por darme la salud, la vida, bendecirme y permitirme formarme como una profesional al servicio de la sociedad.

A mis padres Héctor José Quintana Barreto y Elvira Rivera Sánchez que son el motor en mi vida, gracias a la formación que me brindaron ustedes, para ser la persona íntegra que soy hoy en día, quienes me apoyaron, acompañaron, y me dieron ánimos en cumplir este gran logro en mi vida.

A la Universidad Militar Nueva Granada, como centro de formación de conocimientos siendo una base para lograr profesionales íntegros al servicio de la sociedad.

Agradezco al PhD. Juan Carlos Castro Medina por el acompañamiento recibido, por dedicar su tiempo, su orientación y proporcionar sus conocimientos con el objetivo de cumplir lo planteado en el trabajo de grado.

Agradezco al Geólogo Julio Alberto Triviño Torres, que gracias a Dios pude aprender de muchos temas que me sirvió como base para el desarrollo del presente trabajo, por su tiempo de dedicación, por su orientación, por sus enseñanzas académicas y de vida, por su explicación de cada termino o tema que no entendía, la enseñanza que la Geología es base fundamental en la Ingeniería Civil.

A cada una de las personas que de alguna forma aportaron de manera significativa para realizar este trabajo de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PROBLEMA.....	18
1.1 IDENTIFICACIÓN.....	18
1.2 DESCRIPCIÓN.....	18
1.3 PLANTEAMIENTO.....	18
2. DELIMITACIÓN.....	18
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4. ANTECEDENTES.....	20
5. JUSTIFICACIÓN.....	21
6. MARCO REFERENCIAL.....	22
6.1 MARCO TEÓRICO.....	22
6.1.1 CEMENTO PORTLAND.....	22
6.1.2 MORTERO.....	24
6.1.3 PUZOLANA.....	24
6.2 MARCO LEGAL.....	27
7. METODOLOGÍA.....	28
8. CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA TEMÁTICA QUE INTENGA EL DOCUMENTO: “EL COLLI ALBANI CALDERA MÁFICA (ROMA, ITALIA): ESTRATIGRAFÍA, ESTRUCTURA Y PETROLOGÍA” [21].....	29
8.1 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO [21].....	29
8.2 INTERPRETACIÓN DEL CONTENIDO DEL DOCUMENTO [21].....	35

9. CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA TEMÁTICA QUE INTENGA EL DOCUMENTO: “EL AGREGADO VOLCÁNICO DE MORTEROS ANTIGUOS ROMANOS DE LA COLINA CAPITOLINA: CRITERIO IDENTIFICACIÓN PETROGRÁFICA DE “PUZOLANA” DE ROMA E IMPLICACIONES HISTÓRICAS” [18].	41
9.1 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO [18]	41
9.2 INTERPRETACIÓN DEL CONTENIDO DEL DOCUMENTO [18].	57
10. CAPÍTULO 3: CONSIDERACIONES GENÉTICAS DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL EN SUPERFICIE DEL MATERIAL PIROCLÁSTICO O PUZOLANICO Y DE SUS CARACTERÍSTICAS INGENIERILES	60
10.1 VULCANISMO.	60
10.2 LOCALIZACIÓN ESPACIAL EN LA SUPERFICIE DE DEPOSITOS PIROCLASTOS LITOSOMAS.	61
10.3 MORFOLOGÍA DEL EDIFICIO VOLCÁNICO.	61
10.4 VULCANISMO-TECTONISMO.	62
10.5 PROPIEDADES INGENIERILES DE DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS “PUZOLANA”.	62
11. CAPITULO 4: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN NO EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN MATERIAL DE ORIGEN NATURAL CON RELACIÓN A SUS USOS INGENIERILES.	63
12. CONCLUSIONES.	65
13. RECOMENDACIONES	67
14. BIBLIOGRAFÍA	68

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Clasificación de Puzolana, Fuente: Lea´s [21]. .....	25
Ilustración 2. Mapa geológico simplificado del volcán Colli Albani .....	31
Ilustración 3. Compuesto columna estratigráfica de Colli Albani litosomas.....	34
Ilustración 4. Reconstrucción de la estructura del litosoma Vulcano Laziale.....	39
Ilustración 5. Reconstrucción de la estructura del litosoma de Tuscolano- Artemisio .....	40
Ilustración 6. Reconstrucción de la estructura del litosoma de la Via dei Laghi. ....	41
Ilustración 7. El sustrato geológico de la ciudad Colina Capitolina .....	43
Ilustración 8. a) vista de la Colina Capitolina con las estructuras de las muestras. b) detalle de muestreo en el Templo de Júpiter Capitolino .....	46
Ilustración 9. Fotomicrografías de clastos escoria que se producen en los morteros de los romanos y en los depósitos piroclásticos de Colli Albani.....	53
Ilustración 10. Fotografías de secciones delgadas de muestras de mortero.....	56

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos químicos determinados por la ASTM C 618 [18]. .....	26
Tabla 2. Requisitos físicos determinados por la ASTM C 618 [18]. .....	27
Tabla 3. Agregados morteros composición y cronología de inferidos .....	45
Tabla 4. Indica todas las características mineralógicas y textura de los monumentos estudiados. ....	51

## GLOSARIO

### **Biotita.**

“Especie del grupo de las micas, de formula  $K(MgFe)_3(OH)_2[(AlFe)Si_3, O_{10}]$ ” [1].

### **Calcita.**

“Carbonato cálcico  $CaCO_3$ . Romboédrico. Es muy frecuente en la naturaleza, en cristales transparentes (espato de Islandia), en masa cristalinas (mármol), en masas concrecionadas (pisolitas, estalactitas, estalagmitas). Brillo vítreo, color variable. Blanca o incolora si esta pura. Color de la raya, blanco. Exfoliación fácil” [1].

### **Caldera.**

Valle redondeado, de la forma que indica su nombre, y que abunda en los países volcánicos, como debido a denudación de un antiguo cráter [1].

### **Cenizas volcánicas.**

“Piroclastos de menos de (2-64 mm) de tamaño, producidos durante una erupción explosiva” [22].

### **Clinopiroxeno.**

“Los clinopiroxenos pertenecen al grupo de piroxeno cuya fórmula es  $R_2(Si_2O_6)$ ” [1].

### **Cráter.**

“Abertura situada dentro de la masa de los conos volcánicos, con forma de cono interior invertido y cuyo fondo se abre una o varias bocas ignívolas” [1].

### **Escoria.**

“Lava esponjosa de los volcanes” [1].

### **Feldespatos.**

“Cada uno de los minerales de un grupo de silicatos muy comunes de constitución parecida, pues tiene como base de la estructura una red de oxígeno, silicio y aluminio” [1].

### **Félsico.**

“Aplicase a la roca ígnea que contiene notable cantidad de feldespato, o feldespatoide y sílice” [1].

### **Flancos.**

“Partes de la superficie plegada comprendida entre dos zonas de charnela sucesivas” [23].

**Flogopita.**

“Mica de formula  $KMg_3[(F, OH)_2 AlSi_3O_{10}]$ . Monoclínico. Color marrón o amarillen. Es un mineral pneumatolítico” [1].

**Fonolita.**

“Roca volcánica que procede del magma de las sienitas nefelinicas; compactada. De color gris azulado. Se divide fácilmente en placas que, al ser golpeadas con el martillo, dan sonido metálico. Puede contener fenocristales formados de feldespatos alcalinos y feldespatoides, con anfíboles y piroxenos” [1].

**Granate.**

“Cada uno de los minerales de un grupo que cristaliza en cubos y que contiene muchas especies distintas” [1].

**Ignimbritas.**

“Roca tufítica lanzada al aire en finísimas partículas por erupciones de lavas acidas e intermedias y que se han depositado de una nube ardiente en estado ígneo. Según su tamaño se dividen en lapiditas, lenticulitas y pulverulitas. Sin. Toba volcánica” [1].

**Lava.**

“Materia derretida que sale de los volcanes al tiempo de la erupción, formando arroyos encendidos. Fría, y en estado sólido, es roca de textura vítrea o vitro porfídica” [1].

**Leucita.**

“El aluminosilicatos de potasio ( $AlSi_2O_6$ ) en cristales tetraédricos incoloros o blancos, común en algunas rocas volcánicas con un alto contenido de potasio. Mineral característico del potasio y del magmatismo ultra potásico, muy común en las rocas volcánicas efusivas de la Provincia del Lacio Magmático y del Vesubio” [1].

**Mafica.**

“Este término se aplica a los minerales ferromagnesianos y a otros, no félsicos, que contiene una roca ígnea” [1].

**Magma**

“Masa diluida, engendrada en el interior de la corteza y de la que se cree derivan las rocas ígneas mediante diferenciaciones, cristalización y otros procesos de consolidación. El *magma* abarca no solo la materia de toda la roca ígnea, sino también flujos volátiles y líquidos residuales que pueden haberse desprendido durante la consolidación, o después de ella” [1].

**Mica.**

“Son cada uno de los minerales de un grupo, eminente laminares, divisible en hojas delgadas, elásticas que se desgarran en vez que rompan. Forma parte de los granitos más antiguos. El color puede ser blanco, amarillento, verdoso, rojizo, pardo, violeta, lila, negro, dorado, plateado o bronceado. Hay varias clases de micas: magmáticas, potásica y líticas” [1].

**Mineralogía.**

“Parte de la historia natural que trata de los minerales” [1].

**Nefelina.**

“Nombre común de doleritas y basaltos nefelinicos olivino. Roca de textura afanítica o porfídica, compuesta principalmente de augito y nefelino” [1].

**Olivino.**

“Formula:  $(MgFe)_2[SiO]_4$ . Rómbico, holoédrico. Cristales de muchas caras, sobre todo en el olivino meteórico” [1].

**Orogenia.**

“Presión orogénica” [1].

**Petrografía.**

“Sistemática descripción de las rocas basada en observaciones de campo y en el examen macro y micro-gráfico de los ejemplares recogidos. El concepto de *petrografía* es, pues, más amplio que el de litología, pero más restringido que el de petrología, ya que este implica la interpretación a más de la descripción” [1].

**Piroclastos.**

“Se dice de los depósitos volcánicos fracturados, tales como conglomerados, aglomerados, toba y cenizas” [1].

**Plagioclasa.**

“Cada uno de los feldspatos calco sódicos de las rocas volcánicas. Mezcla cristalina de feldspatos cálcico con el sódico, formando un grupo según las proporciones más diversas en que guardan identidad los volúmenes equivalentes. Triclinico pinacoidal. Comprende varios minerales: albita, oligoclasa, andesina, labrador, bytownita, anorthita, etc. Todos ellos son mezclas isomorfas de albita (Ab) y anortita (An)” [1].

**Porfídica.**

“Se dice de la textura de las rocas ígneas (porfidios), debida a la existencia de fenocristales notoriamente mayores que los individuos minerales de la pasta cristalina entre los que aquellos se incluyen; esta pasta puede ser también vítrea” [1].

**Pumita.**

“Piedra pómez, liparita que no forma masa rocosa, sino a modo de espuma solidificada como costra o escorias en la superficie de las lavas acidas. En rigor es espuma de vidrio, que debe su aspecto y estructura celular a la gran cantidad de burbujas de gas que escaparon cuando se solidifico” [1].

**Puzolana**

“Toba volcánica que rodea las coladas traquíticas que resultaron de las erupciones volcánicas de Napoles. Se utiliza, mezclada con la cal, para hacer morteros hidráulicos. Sin. Cemento romano” [1].

**Riolita.**

“Roca volcánica de la familia de los granitos aplíticos, equivalente efusivo de estos últimos; suelen tener fenocristales de cuarzo y ortosa en pasta vítrea o criptocristalina” [1].

**Sanidina.**

“Feldespato de sosa con formula  $(K, Na) [AlSi_3O_8]$ . Triclinico pseudomonoclinico. Es un feldespato vítreo con fisuras, que se encuentra en las rocas volcánicas reciente” [1].

**Tefrita.**

Denominación empleada por Plinio para designar piedras color gris ceniciento que solo tiene ese carácter común [1].

**Toba.**

“Piedra caliza, muy porosa y ligera. Formada por la cal que llevan en disolución las aguas de ciertos manantiales y que va depositándose en el suelo o sobre las plantas u otro impedimento que hallan a su paso. Difiere esencialmente de la toba Volcánica, a la que solo se asemeja en la estructura, pero no tiene otra analogía, ni por la composición ni por la génesis y origen” [1].

**Toba Volcánica**

“Roca compuesta de fragmentos piroclásticos consolidados, alguno de los cuales pueden distinguirse a simple vista. Si los fragmentos grandes tienen mayor tamaño que la nuez, la roca se llama brecha o aglomerado volcánico. Los componentes que predominan son trozos de cristales, de roca o de vidrio, se tratara, respectivamente, de toba cristalina, lítica o vítrea” [1].

**Traquita.**

“Roca volcánica, afanítica, casi siempre porfirica, con textura traquitica, pilotaxica o hialopilitica; compuesta de feldespatos alcalinos y uno o varios minerales maficos, principalmente biotita y augito” [1].

**Tufa.**

“Deposito formado alrededor de un surtidor, constituido por carbonato cálcico, en masa porosa, concrecionada o compactada” [1].

**Vesiculosa.**

“Aplicase a la roca en la que existe gran cantidad de huecos (debidos al escape de los gases que contuvo antes de enfriarse), que presenta aspectos como de espuma o esponja” [1].

**Vítrea.**

“Se dice a la textura de las rocas que se consolidaron rápidamente y tiene superficie lisa y aparentemente homogénea” [1].

**Xenolitos.**

“El fragmento alotígeno de roca, extraño a aquella ígnea en que se incluye” [1].

**Zeolita.**

“Forma un grupo natural de silicatos que llenan cavidades forma un grupo en las rocas básicas vacuolares. Todas están hidratadas y dan, por lo tanto, agua en el tubo de ensayo y casi todas son aluminíferas” [1].

## RESUMEN

La presente investigación satisface el objetivo de entender el comportamiento geodinámico de las puzolanas empleado como agregado pétreo en los morteros de Roma Italia, Analizando sus propiedades desde su génesis según el documento [21] , este proporciona información de cómo ha sido la evolución de la caldera del volcán Colli Albani (Roma-Italia), siendo las puzolanas un producto de las erupciones volcánicas, este agregado fue explotado por los romanos para producir morteros desde el desarrollo de la primera mampostería de hormigón.

Además, se analiza la petrografía de las puzolanas en los morteros romanos del informe [18], este informe describe las características y conjunto mineralógico para lograr distinguir los diferentes productos volcánicos empleado para producir mortero en Roma Italia.

Esta investigación logra comprender por qué varias estructuras romanas actualmente se mantienen siendo longevas y resistente, teniendo en cuenta la génesis y las propiedades geomecánicas de las puzolanas naturales como agregado fino, este podría emplearse actualmente de forma más consciente en los morteros convencionales teniendo como base fundamental la génesis del agregado pétreo.

**Palabras claves:** Puzolana, mortero.

## ABSTRACT

The present investigation meets the objective of understanding the geodynamic behavior of the pozzolans used as stone aggregate in the mortars of Rome Italy, Analyzing its properties since its genesis according to the document [21], this provides information on how the evolution of the boiler has been of the Colli Albani volcano (Rome-Italy), being the pozzolanas a product of volcanic eruptions, this aggregate was exploited by the Romans to produce mortars since the development of the first concrete masonry.

In addition, the petrography of the pozzolans in the Roman mortars of the report is analyzed [18], this report describes the characteristics and mineralogical set to distinguish the different volcanic products used to produce mortar in Rome Italy.

This research manages to understand why several Roman structures currently remain long-lasting and resistant, taking into account the genesis and geomechanical properties of natural pozzolans as a fine aggregate, this could currently be used more consciously in conventional mortars based on the genesis of the stone aggregate.

**Keywords:** Pozzolana, mortar.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico en el mundo ha contribuido al aumento del consumo de los recursos naturales, generando el incremento del consumo energético y el daño ambiental.

De acuerdo con los científicos el calentamiento global ocasionado por diversos factores entre ellos el constante aumento de concentraciones de gases de invernadero es una problemática global.

La producción del cemento anual en el mundo corresponde a 1,6 mil millones de toneladas, aproximadamente el 7% de la carga mundial del dióxido de carbono a la atmosfera [19], siendo responsable de una cantidad de gases de efecto invernadero. Por otra parte, la explotación minera de materias primas como caliza y arcilla requiere grandes áreas de deforestación que de forma directa afecta las capas del suelo.

Típicamente el hormigón contiene 12% de cemento, 8% de agua de mezcla, y 80% de agregados en masa. Esto indica que a nivel mundial para la producción de hormigón se consume en roca triturada, grava, y arena alrededor de 10 mil millones de toneladas, (9 mil millones de toneladas de arena y roca y 1 mil millones de agua para la mezcla al año) [20].

La industria del concreto es el mayor consumidor de los recursos naturales en el mundo, por lo tanto, se hace necesaria la búsqueda de materias primas alternativa en la producción del cemento, materiales que sean duraderos y sostenible con el medio ambiente. La estructura de hormigón está diseñada para una vida útil de 50 años. Pero las construcciones de hormigón demuestran que en ambientes marino y urbano las estructuras se empiezan a deteriorarse en 20 a 30 años o incluso menos tiempo [19].

En la fabricación de los morteros la industria últimamente ha tratado de emplear los agregados más finos que se encuentra en la naturaleza como la escoria, cenizas, entre otros conocidos como "Puzolana".

El desarrollo de la actividad propia de la ingeniería civil requiere del conocimiento del porque los materiales empleados en la construcción resultan ser de diferentes calidades en sus propiedades inherentes a sus usos, sin embargo, este requerimiento comúnmente no se responde desde la esencia genética de los materiales naturales empleados. Generalmente el registro de las propiedades ingenieriles del material convencional (concreto, agregados pétreos, etc.) utilizados en las obras civiles se obtiene por medio de investigación basada en una metodología experimental de laboratorio.

La diversidad de materiales naturales a partir de los cuales se obtiene la totalidad de los materiales empleados en el desarrollo de la ingeniería civil registrado, igualmente diversidad de propiedades ingenieriles que constituye la esencia del comportamiento físico-mecánico del material utilizado en las obras civiles; así, para entender el porqué de los resultados obtenidos experimentales de laboratorio es necesario primero identificar, analizar e interpretar la Genesis del material natural; esta metodología de investigación de carácter científico por medio de la cual las pruebas experimentales de laboratorio constituye la comprobación y cuantificación de caracterización físico mecánica de un material predeterminada a partir de su interpretación genética.

Un ejemplo de metodología de investigación de carácter científico es el expuesto en el documento [18] titulado “El agregado volcánico de morteros antiguos romanos de la Colina Capitolina: criterios para identificación petrográfica de “Puzolanas” de Roma e implicaciones históricas.

El documento citado está científicamente apoyado en el documento [21] titulado “El Colli Albani caldera mafica (Roma, Italia): Estratigrafía, estructura y petrología.

La identificación y descripción del contenido temático de los documentos citados evidencia la metodología de estudio tendiente a conocer o establecer las propiedades genéticas de los agregados pétreos y su incidencia con el comportamiento físico-mecánico del mortero que los contiene.

## **1. PROBLEMA**

### **1.1 IDENTIFICACIÓN**

Actualmente las puzolanas naturales como material de construcción no se emplean de forma específica a causa de muchos factores, entre ellos, que se desconoce su génesis.

### **1.2 DESCRIPCIÓN**

La producción de cemento con aditivos es una práctica habitual en la industrial a nivel mundial. El empleo de aditivo evidencia aspectos positivos tanto económicos (ahorro energético por la cantidad determinada de cemento con aditivos), ambiental (disminución de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmosfera), y como técnicos (mejor comportamiento en las propiedades mecánicas).

Debido al avance constante de la producción del concreto y el empleo de los cementos con adiciones puzolánicas, se ha hecho necesario intensificar las investigaciones sobre el conocimiento de sus propiedades geomecánicas, teniendo en cuenta la diversidad de estas adiciones.

Las investigaciones actuales sobre puzolanas naturales se enfocan en la capacidad de reaccionar y el porcentaje de reemplazamiento de estas en el cemento, dejando de lado el conocer y entender las puzolanas naturales desde su génesis.

### **1.3 PLANTEAMIENTO**

El presente trabajo se basa en la recolección de información teórica sobre puzolanas naturales entendiendo desde el punto de vista geodinámico su comportamiento y su posible uso como agregado pétreo en el mortero, teniendo en cuenta la normatividad actual.

## **2. DELIMITACIÓN**

El presente trabajo se enmarca en la comprensión del comportamiento geodinámico registrado en las puzolanas aflorantes en el área de la ciudad Colina Capitolina-Roma (Italia), siendo empleadas como agregados pétreos en las edificaciones de la ciudad, basado en la información bibliográfica [18].

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Entender el comportamiento geodinámico de las puzolanas de carácter volcánico a partir de sus características genéticas, mediante una metodología que satisfaga el análisis genético del material.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Entender el artículo de estudio [18].
- Analizar la información geológica de la ciudad Colina Capitolina Roma, Italia.
- Analizar las propiedades genéticas del material puzolánico del volcán Colli Albani Roma, Italia.
- Correlacionar las propiedades genéticas del material puzolánico con el comportamiento geo-mecánico registrado en las edificaciones construidas con este material.

#### 4. ANTECEDENTES

En la historia de la humanidad los constructores, arquitectos e ingenieros han buscado alternativas tecnológicas para realizar sus construcciones. En el año (75 a.c), los romanos incorporaron a la mezcla del mortero la puzolana como agregado petreo empleado en la construcción del teatro de Pompeya, la construcción del Panteón de Adriano construido en el año (123 d.c) manteniendo el récord de ser la mayor construcción de concreto no armado que existe en el mundo, así como el Coliseo Romano (82 a.c), entre otras construcciones las cuales se pueden observar hoy en día.

Dentro el uso del cemento Portland adicionado con adiciones activas, el más antiguo que se conoce es el cemento puzolánico, este se empleó en la civilización romana, con el descubrimiento de un agregado extraído en la localidad llamado <<Pozzuolo>> junto a Nápoles, Italia.

De ahí el termino puzolana su significado hace referencia a una toba volcánica que rodea las coladas traquíticas que resultaron de erupciones volcánicas de Nápoles [1].

La investigación de las puzolanas naturales ha presentado constantes avances con el tiempo, las primeras investigaciones se enfocaban en investigar la clasificación según el origen [2].

Posteriormente, se fortaleció la necesidad de entender cuál es el comportamiento de las puzolanas naturales debido que existe diversas puzolanas con diferente actividad puzolánica, las investigaciones han hecho avances en la definición de las características mineralógicas [3,4], físicas [5,6] y químicas [7, 8, 9, 10,11].

En los últimos años la mayor parte de las investigaciones se han centrado en evaluar las propiedades mecánicas de los morteros con agregado fino de puzolana las más utilizadas son las cenizas volcánicas, la pumita, y las zeolitas. Las conclusiones de las investigaciones señalan los beneficios que aportan estas a los cementos adicionados, son con respecto a resistencia a la compresión, ataques por sulfatos y calor de hidratación [3,7, 12, 13, 14,15]. A partir de los resultados obtenidos de las investigaciones, se limitan a evaluar el comportamiento mecánico del mortero puzolánico versus un mortero convencional.

## 5. JUSTIFICACIÓN

La búsqueda de materias primas alternativas en la fabricación del mortero se ha venido realizando desde el siglo anterior, actualmente ante la demanda del cemento a nivel mundial y los efectos que se generan a cerca de su producción, el consumo energético y emisiones nocivas. Se ha requerido la implementación de materiales alternativos que puedan cumplir con la normatividad que se exige para que estos puedan ser adicionados en el cemento, reducir la contaminación y disminuir los costos que estén relacionados a su producción.

A tal efecto en los últimos años se han llevado estudios de diversas partes del mundo sobre la implementación de puzolanas como agregado pétreo, tanto origen natural como artificial, ya que, por sus características fisicoquímicas, pueden ser adicionadas en el mortero.

Los estudios realizados han permitido determinar que la adición de puzolanas en el mortero mejora sus propiedades mecánicas, reducción del calor de hidratación, disminución de permeabilidad, incremento a la resistencia a la compresión en edades tardía, disminución considerable en el consumo del cemento y mejora la resistencia a los ataques químicos [15], entre otras.

Además, es importante estimar la actividad puzolánica siendo quizás la propiedad fundamental de estos materiales, para su adecuada selección es necesario considerar su génesis, composición física, composición química y composición mineralógica. Por lo tanto, se ha hecho necesario aumentar investigaciones relacionadas en conocer y evaluar sus propiedades.

El presente trabajo entenderá el comportamiento geodinámico de las puzolanas naturales, teniendo en cuenta los fundamentos teóricos para consolidar argumentos técnicos, permitiendo el uso de estos materiales de forma más consciente, para ser aprovechado como agregado pétreo (*fino*) en el mortero logrando un mejor comportamiento mecánico.

## **6. MARCO REFERENCIAL**

En el presente capítulo se realizará una descripción de los temas abarcados dentro de esta investigación.

### **6.1 MARCO TEÓRICO**

#### **6.1.1 CEMENTO PORTLAND**

Es un material aglutinante con propiedades de adherencia y cohesión, capaz de unir fragmentos de minerales entre sí, formando materiales compactos y de resistencia mecánicas importantes.

El cemento Portland es la mezcla de materias primas, que consiste en materiales arcillosos con alto contenido de sílice y calcáreo tales como la caliza, entre otros materiales como óxido de hierro.

Esta mezcla es procesada a altas temperaturas y mezclado con yeso. El nombre menciona un mineral que abunda en Portland, Inglaterra [16].

##### **- PROCESO DE FABRICACIÓN**

El proceso de fabricación se emplea en una planta productora de forma muy general de la siguiente manera:

##### **- Explotación de materias primas**

Este proceso de explotación se realiza principalmente cumpliendo la normatividad que se exige. Posteriormente los materiales extraídos de una cantera pasan por el proceso de trituración para obtener tamaños máximos de (1”).

##### **- Dosificación, molienda y homogeneización**

Este proceso los materiales pueden tener distintos grados de humedad, posterior se mezcla y molienda con las arcillas hasta obtener una distribución uniforme de las partículas.

##### **- Clinkerización**

Una vez la materia prima este homogenizada es sometida a un tratamiento térmico de temperaturas cercanas a 1450°C en grandes hornos rotatorios, permitiendo la fusión parcial de los componentes generando esferas de diámetros de 4 cm conocida como Clinker. Durante la calcinación cabe resaltar que se genera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

- Enfriamiento

Una vez el material se ha transformado en Clinker sale del horno a una temperatura alrededor de 1300°C, rápidamente debe ser enfriado a 70°C para lograr que el cemento fabricado, después del fraguado no presente cambios volumétricos.

- Molienda de Clinker, adiciones y yeso

Durante este proceso el Clinker es transformado en polvo y es posible agregar las adiciones (por ejemplo, material puzolánico, cenizas volantes, entre otros). Después es adicionado el yeso, este sirve para controlar el endurecimiento del cemento una vez reaccione con el agua.

- Empaque y distribución

El cemento obtenido es transportado a silos de almacenamiento, para luego ser empacado en bulto.

- Almacenamiento del cemento

El tiempo que puede almacenarse un cemento depende del lugar y las condiciones del clima.

- **ADICIONES DEL CEMENTO**

Actualmente se fabrica diversos tipos de cemento para satisfacer las deficiencias, estos deben cumplir con propósitos específicos.

El Clinker Portland puede ser adicionado con otro tipo de material alternativo como cenizas volantes, puzolanas y escoria de alto horno molida, aunque estos materiales no tengan las mismas propiedades aglomerantes, las desarrolla cuando se mezclen con el cemento Portland [16].

- Cemento Portland puzolánico

Producto que se obtiene por la pulverización conjunta de Clinker Portland y puzolana o de una mezcla íntima y uniforme de cemento portland y puzolana finamente pulverizada con adición de una o más formas de sulfato de calcio. El contenido de puzolana debe estar comprendido entre el 25 % y el 50 % en masa de la masa total [17].

## 6.1.2 MORTERO

- DEFINICIÓN

“Mortero, en su definición más general es toda mezcla de [cemento + arena + agua o Él puede tener función estructural, o no tenerla]. Los pañetes, por ejemplo, no poseen función estructural; los morteros usados en mampostería (pega o relleno), o los usados para fundir elementos estructurales, sí poseen tal función” [24].

## 6.1.3 PUZOLANA

### - DEFINICIÓN DE PUZOLANA

Los griegos y los romanos fueron las primeras civilizaciones en utilizar materiales naturales de origen volcánico como agregado en los morteros de cal viva, ya que estos eran los materiales que estaban a su alcance.

El nombre puzolana se relaciona a lo que se encontró por primera vez en la pouzzoles (Italia), cerca al volcán Vesubio. La puzolana es un término genérico que señala diferentes tipos, como la ceniza volcánica, pumita, etc.

De acuerdo con la NTC 3493, las puzolanas naturales silicios o silíceos y aluminosos que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero que en forma de partículas finas y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas normales, para formar compuestos con propiedades cementantes.

Según [1] es una roca con materiales ígneos, estos materiales son resultado de una erupción volcánica explosiva (vapores de gases volátiles). Por varios factores estos materiales de tamaño  $< 2$  mm pasan por un proceso sedimentario convirtiéndose una toba volcánica o roca.

El término de Puzolana se refiere a diferentes materiales de origen volcánico y sedimentario, los cuales poseen una serie de propiedades geodinámicas que se debe tener en cuenta para ser considerado como tal.

Para la ASTM C618 una de las propiedades más importante para ser considerado como puzolana es la suma de los óxidos  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70\%$  y el índice de actividad resistente superior a 75% [19].

### - BREVE HISTORIA DEL USO DE LAS PUZOLANAS

El empleo de materiales cementantes tiene como inicio a las antiguas civilizaciones, desde que el hombre vio la necesidad de utilizar materiales como la arcilla, cal y arena para unir material granular para constituir una estructura que le ayudara a su protección [16].

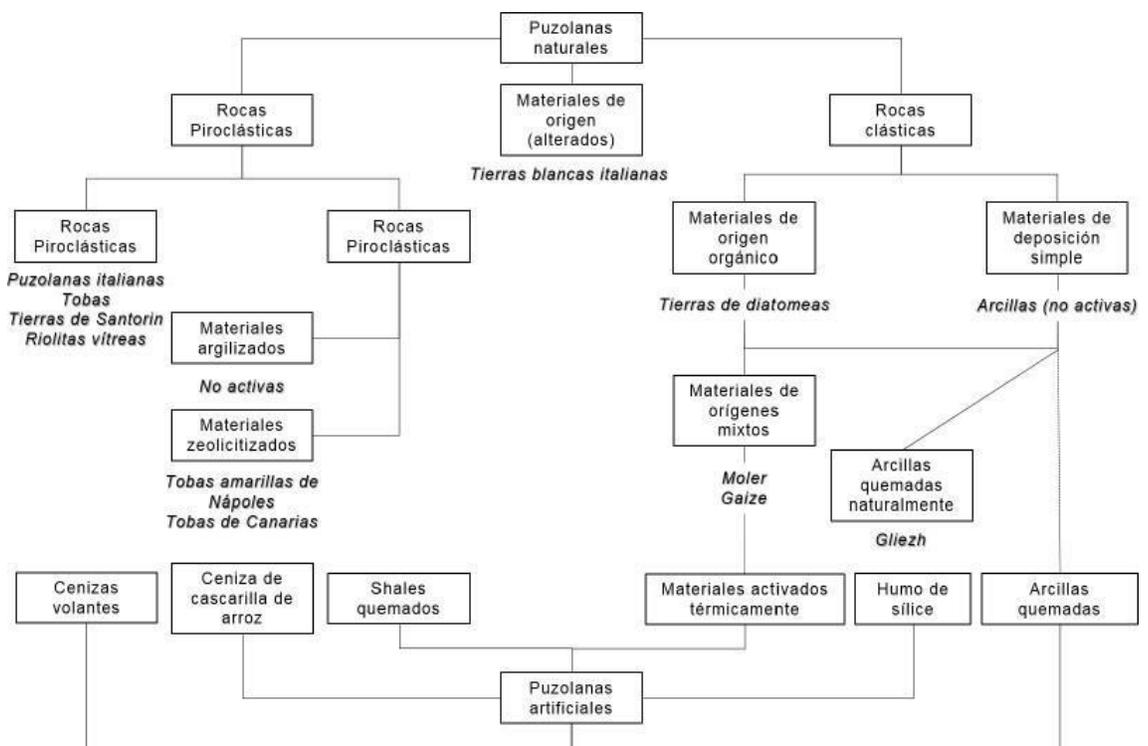
Los Romanos y los Griegos al notar que los morteros de cal viva no resistían suficiente a la fuerza del agua durante largos periodos, incorporaron toda clase de agregado empíricamente, uno de estos fue el agregado de origen volcánico ya que proporcionaban mayor resistencia y duración a la acción del agua.

Actualmente las investigaciones señalan que el uso de puzolana natural como adición en el cemento muestran un comportamiento satisfactorio para reducir la expansión álcali-agregado en muestras de morteros sometidas a condiciones extremas de exposición, además se evidencia una relación directa entre las propiedades físicas, químicas y morfológicas de las puzolanas y su eficiencia para reducir la expansión [20].

### - CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ORIGEN

De acuerdo con Lea's [21], las puzolanas naturales según su origen se clasifican en tres grupos: volcánicos, sedimentarios y artificiales como se indica en la siguiente figura.

Ilustración 1. Clasificación de Puzolana, Fuente: Lea's [21].



- CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANA NATURAL

La caracterización de las propiedades geodinámica de las puzolanas permite entender su comportamiento y la capacidad que puede tener al reaccionar con el hidróxido de calcio (CH). Las características que se analiza para identificar si un material es puzolánico debe cumplir la normatividad [19], estas pueden ser de carácter químico, físico y mineralógico.

Estas características permiten entender desde la génesis las puzolanas naturales su posible comportamiento.

• PROPIEDADES QUÍMICAS (REQUERIMIENTO ASTM C618)

Las propiedades de las puzolanas dependen de su composición química y su estructura interna, las de origen ácido presentan óxidos de sílice ( $SiO_2$ ), aluminio ( $Al_2O_3$ ) y de calcio ( $CaO$ ), la suma de estos compuestos debe ser mayor del 70% en peso total del total de la puzolana, valor que establece la ASTM C618 [19].

Debido a la variabilidad de las puzolanas naturales los valores químicos no son definitivos. Por lo tanto, se tiene en cuenta valores medios que podrían tener estas.

Tabla 1. Requisitos químicos determinados por la ASTM C 618 [18].

Requisitos	Puzolana
	Clase N, ASTM C618
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3, \%$	Min, 70
Trióxido de Azufre $SO_3, \%$	Max, 4
Contenido de humedad, %	Max, 3
Perdida por calcinación, %	Max, 10

- El contenido de  $SiO_2$  (Cuarzo),  $Al_2O_3$  (Óxido de aluminio) y  $Fe_2O_3$  (Óxido de hierro) se relaciona con la actividad puzolánica con el cemento.
- El contenido que posiblemente se pueda encontrar de CaO, indica las impurezas adquiridas dentro el proceso diagenético desarrollado en el depósito, este valor señala la pérdida por calcinación de los materiales puzolánico, este debe estar por debajo de 10% relativamente [19].
- El contenido de azufre  $SO_3$ , es normal en las explosiones volcánicas, este valor debe ser máximo el 4% [18].

Un material puede cumplir con los requerimientos que indica la ASTM C618 y no ser una puzolana, ya que estos tienen diferente génesis. Por lo anterior es importante apreciar otras propiedades de las puzolanas naturales.

- PROPIEDADES FÍSICAS

Las puzolanas naturales de origen volcánico son el resultado de erupciones volcánicas explosivas a causa de tener el magma vapores de agua, las partículas producto de esta erupción por su tamaño de 2 mm – 64 mm son transportados por diversos agentes como el viento que finalmente por gravedad son depositadas en el agua o suelo. Una vez depositadas pueden ser sometidas a cambios físicos.

Para ser utilizadas estas como adiciones minerales se debe caracterizar algunas propiedades físicas como el tamaño de partícula, área superficial específica, la finura, entre otras.

De acuerdo con la ASTM C618, la caracterización física de las puzolanas naturales debe cumplir con los requerimientos que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Requisitos físicos determinados por la ASTM C 618 [18].

Requisitos	Puzolana
	Clase N, ASTM C618
<b>Finura</b> Cantidad retenida en malla 45µm (No. 345), % Max.	Max, 34
<b>Índice de Actividad Resistente</b> , con el cemento a 7 días, % de control con el cemento a 28 días, % de control	Min, 75
Requerimiento de agua, porcentaje de control	Max, 115
Expansión o contracción, %	Max, 0.8

*Nota: los requisitos físicos que establece la ASTM C 618, son del comportamiento del cemento con puzolana natural.*

## 6.2 MARCO LEGAL

- ASTM C618-19 (Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en concreto), esta norma proporciona uno de los métodos para evaluar puzolanas naturales, analizando las propiedades químicas y físicas, de estas con relación al concreto.

- NTC 3493 (Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Portland), Esta norma es idéntica a ASTM C618, se tiene en cuenta los parámetros que se puede aplicar en Colombia.
- NTC 31(Definiciones), Esta norma establece las definiciones relacionadas con la fabricación de los diferentes tipos de cementos.

## **7. METODOLOGÍA**

La metodología propuesta es de orientación descriptiva el cual se basa en entender la información de la génesis del material pétreo “Puzolana” empleado como agregado fino en el mortero, teniendo en cuenta los aspectos geológicos y petrográficos.

Se establecieron unas etapas para el proceso del estudio de la siguiente manera:

1. Analizar la información del artículo de estudio [18].
2. Revisión del estado del arte de las puzolanas naturales teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
  - La cartografía geológica, es decir la geología local, geomorfología y perfiles geológicos.
  - La litología.
3. Interpretación del ambiente de formación de la puzolana del caso de estudio [18].
4. Relacionar teóricamente las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las puzolanas con el comportamiento geodinámico que presenta en las edificaciones construidas con este material.

## 8. CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA TEMÁTICA QUE INTENGA EL DOCUMENTO: “EL COLLI ALBANI CALDERA MÁFICA (ROMA, ITALIA): ESTRATIGRAFIA, ESTRUCTURA Y PETROLOGIA” [21].

### 8.1 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO [21].

“Nuevos resultados para el volcán Colli Albani (Roma, Italia) registrados para el Mapa geológico de Italia en escala 1: 50.000 (Proyecto CARG), integrados a los anteriores, proporcionan información sobre la evolución de la caldera<sup>1</sup>. El Colli Albani, un volcán de reposo, se convirtió en activo en ~ 600 ka. Composiciones eruptivas son consistentemente maficas<sup>2</sup> (<50% SiO<sub>2</sub>); sin embargo, la morfología y el estilo eruptivo explosivo predominantemente coinciden con los de las calderas félsicos<sup>3</sup>. El volcán es de material compuesto, que contiene múltiples edificios volcánicos superpuestos o litosomas. El edificio más antiguo Vulcano Laziale (VL), ca. 600 - 350 ka (miles de años) es una meseta de 1.600 Km<sup>2</sup> de ignimbritas<sup>4</sup> con una caldera central” [21].

“Después de la última erupción grande (> 50 Km<sup>3</sup> de depósitos), formando las ignimbritas Unidad Erupción Villa Senni en CA. 355 ka (*antes de cristo*), dos edificios fueron construidos dentro de la caldera: (1) La forma de herradura Tuscolano-Artemisio (TA) edificio compuesto (o litosoma) se compone de coalescencia, pericaldera, conos de escorias relacionados fisuras-intercaladas con flujos de lava; el sistema de fisuras forma dos segmentos controlados por fracturas regionales; (2) El estratovolcán Faete empinado (949 m) llenó la caldera. Los litosomas TA y Faete parte Inter digitan y se emplazaron en ~ 350 - 260 ka. Sus productos indican una reducción tasas (*frecuencias*) de erupción en relación con el período de VL y un cambio a erupciones efusivas y ligeramente explosivos. La fase más reciente y todavía activo de la actividad freatomagmática<sup>5</sup> formado lagos volcánicos y conos de ceniza se superponen a lo largo de las laderas del oeste y norte del volcán, llamados colectivamente Via dei Laghi litosoma compuesta. La caldera Colli Albani es polifásica: (1) una caldera poco a poco se asocia con grandes ignimbritas volumen del edificio VL; la presente forma de la caldera está relacionada con la erupción Villa Senni; 2) el edificio compuesto TA, surgió de fisuras periférica-Caldera, no está relacionada con las fases explosivos de colapso de la caldera: los productos finales TA cubren una pared de la caldera morfológicamente estable” [21].

---

<sup>1</sup> Caldera: expresión morfológica generada por el colapso de un edificio volcánico preexistente.

<sup>2</sup> Mafica: bajo contenido de sílice.

<sup>3</sup> Félsico: alto contenido de sílice.

<sup>4</sup> Ignimbrita: tipo de material volcánico resultante del endurecimiento de coladas de lodos volcánicos.

<sup>5</sup> Freatomagmática: relación magma-agua superficial.

“Las fracturas periféricas que alimentan el edificio compuesto TA se interpretan como estructuras volcánico-tectónicas activados durante la etapa de baja tardía de la caldera. Tarifas reducidas durante la erupción TA y las etapas (10 Faete - 1 Km<sup>3</sup> / Respecto 1 ka > 100 Km<sup>3</sup> / 1 ka para el edificio VL) sugieren una recarga reducida de la cámara de magma que pueden haber inducido la deflación prolongada y bajando del suelo de la caldera y la apertura de inmersión hacia el exterior fracturas periféricas. Por esta interpretación, el edificio TA representa la expresión en la superficie de diques de anillo en profundidad. La ausencia de fisuras-estructuras similares a lo largo del borde de la caldera occidental puede relacionarse con la profunda geometría de los anillos faltas de inmersión hacia el interior en esas áreas y por lo tanto no orientada favorablemente para la intrusión magma durante un período de subsidencia general. Por el contrario, la siguiente fase y todavía freatomagmática activo, que ha emplazado el edificio compuesto Via dei Laghi, está situado en el lado occidental de la caldera, y por lo tanto puede estar relacionada con las condiciones de resurgimiento” [21].

- Descripción vulcanológica de Colli Albani

“Colli Albani (Roma) es un volcán cuaternario (*Ilustración 2*), se convirtió en activo en aproximadamente 600 ka (De Rita et al., 1995). El reciente descubrimiento de freatomagmatismo Holocénico y depósitos de lahar indica que el volcán sigue activo, aunque de reposo (Funciello et al., 2003). Ambos productos explosivos y efusivos son notablemente (*no saturados pobre contenido de sílice*) y pertenecen a la HK-Serie (Fornaseri et al., 1963; Trigila et al., 1995). A pesar de sus composiciones muy pobres en sílice, el volcán muestra características idénticas a los de volcanes félsicos), como baja relación de aspecto ignimbritas. La estructura y la historia de esta caldera es aún poco conocidos, aunque varios autores han sugerido que su forma se controla mediante la configuración estructural del sustrato (por ejemplo, Funciello y Parotto, 1978; Rosa, 1995; De Rita et al., 1995)” [21].

“Estilos eruptivos y las tasas (*frecuencias*) han experimentados cambios significativos a través de la historia del volcán, por lo que incluso los primeros vulcanólogos identificaron diferentes períodos de actividad (Brocchi, 1820; Ponzi, 1875; Sabatini, 1900). La estratigrafía propuesta por Fornaseri et al. (1963), y por Alberti et al. (1967) hojas centrales primeros identificados formando actividad ignimbrite, Seguido por tanto a ligeramente explosivo, actividad central y excéntrico efusivo pequeño volumen, y seguido a su vez por fase freatomagmatica, formando los varios maars<sup>6</sup> lo largo de las pendientes occidentales y septentrionales del volcán (*Ilustración 2*). De Rita et al. (1988, 1995) llamado el período temprano de la actividad de la fase Tuscolano-Artemisio” [21].

---

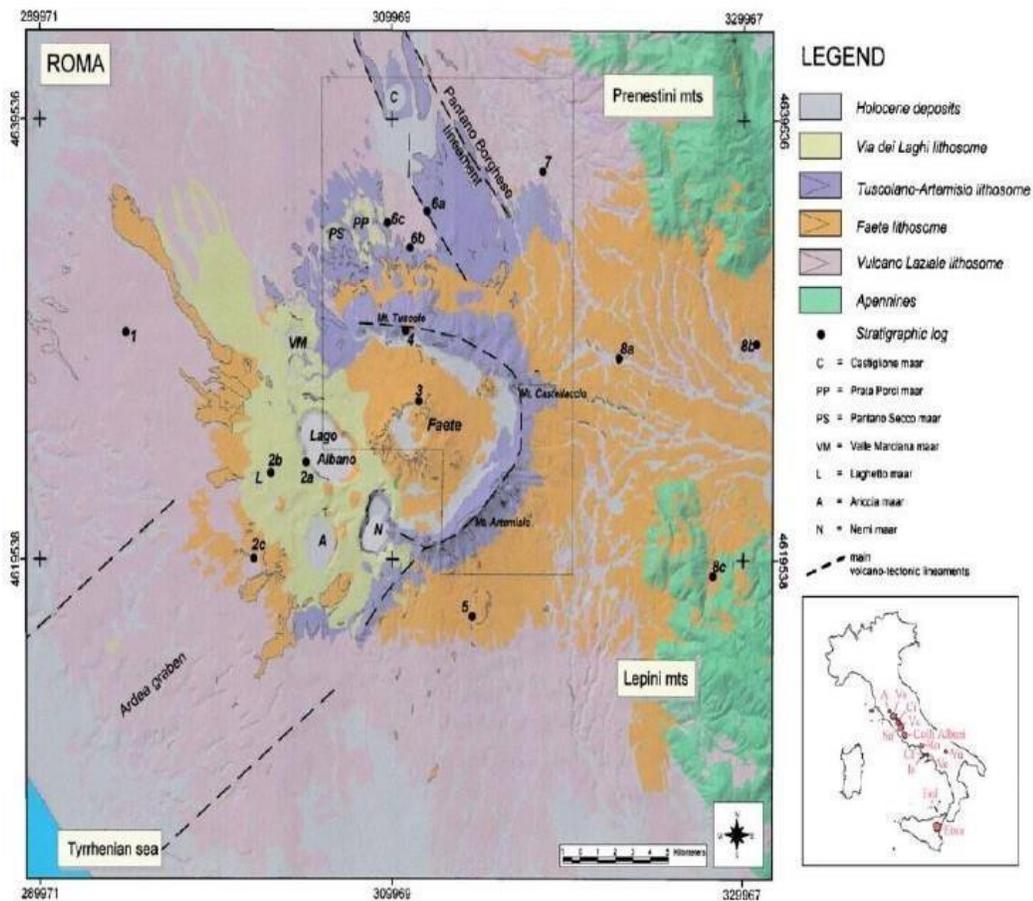
<sup>6</sup> Maars: cuerpos de agua o lagos.

“En este trabajo se organiza la estratigrafía del volcán Colli Albani en litosomas o edificios definidos por una reconocible que se refiere a un centro eruptivo definido y a un estilo eruptiva definido, y en discordancia delimitada unidades estratigráficas (Salvador, 1987)” [21].

“La química peculiar (*característica*) de los productos Colli Albani han atraído la atención de varios científicos desde tiempos del renacimiento (Mercati, 1574; Cesalpini, 1596). Los productos del Colli Albani, Tanto lava y piroclásticos muestran composiciones de básica a ultra básicas ( $SiO_2$  entre 43% y 53%) alto contenido de K ( $K_2O= 6 - 10$ ) y los valores de la  $K_2O$  En un 2, O (3 - 8) que hacen de ellos pertenecientes a la HK-Serie (Appleton, 1972; Conticelli y Peccerillo, 1992; Serri et al., 1992)” [21].

“Estudios petrológicos recientes han indicado que la química peculiar del magma Colli Albani está probablemente relacionada con los procesos de diferenciación en un  $CO_2$ - ambiente saturado derivado de decarbonización de carbonatos que rodean la cámara de magma, cristalizando un conjunto leucita + clinopiroxeno (Trigila et al., 1995; Freda et al., 1997; Palladino et al., 2001; Dallai et al., 2004)” [21].

*Ilustración 2. Mapa geológico simplificado del volcán Colli Albani, que muestra los cuatro litosomas reconocidos, Líneas negras contornean las lavas. El recuadro de inserción indica el área del mapa geológico que se muestra en la Ilustración. 2. Las coor de Ilustración 2. Mapa geológico simplificado del volcán Colli Albani, que muestra los cuatro litosomas reconocidos (ver texto). Líneas negras contornean las lavas. El recuadro de inserción indica el área del mapa geológico que se muestra en la Ilustración. 2. Las coordenadas geográficas se refieren al sistema UTM 33. Las abreviaturas en el cuadro a la derecha indican los volcanes cuaternarios: A — cúpula de Amiata; Vs: complejo de caldera de Vulsini; Ci: cúpulas de Cimini; Vc: estratovolcán Vico; Sa: complejo de caldera Sabatini; Ro - estratovolcán Rocca monfina; Cf - complejo de caldera Campi Flegrei; Is - Ischia stratovolcano; Ve - estratovolcán Vesuvio; Vu - Estratovolcán buitre; Eol - Islas Eolias.*



Nota: Recuperado de: [21], (Giordano, 2006), Pagina: 2.

- ENTORNO GEOLÓGICO

El volcán Colli Albani hace parte a lo largo de 250 km del cinturón volcánico pleistoceno-reciente con tendencia NW, K-alkalina peri-Tirreno (por ejemplo, Conticelli y Peccerillo, 1992; Barberi et al., 1994), que se extiende desde Mt. Amiata al norte a Mt. Vesuvio al sur, e incluye las calderas de Bolsena y Latera (Vulsini Mts), las cúpulas Cimini, el estratovolcán Vico, las calderas Bracciano y Sacrofano (Sabatini Mts), la Ernici-Lepini campo monogenético volcánica, el volcán Roccamonfina, los volcanes Ventotene-Ponza, la caldera resurgente Ischia, la caldera Campi Flegrei, y, al E, el volcán Monte Vulture (Ilustración 2).

Precursor a este volcanismo es el vulcanismo K-calc-alkalino que se formó varios riodacítica<sup>7</sup> a complejos de domos riolíticos<sup>8</sup> durante el Plioceno superior (cúpulas Tolfa, cúpulas Ceriti-Manziate, Pontinian cúpulas submarinas).

<sup>7</sup> Riodacítica: roca volcánica lávica.

<sup>8</sup> Riolíticos: roca volcánica lávica.

El origen del vulcanismo en esta área ha sido debatido durante mucho tiempo, sobre todo el origen del alto carácter de K de los magmas. Se cree que los procesos de extensión de la espalda de arco pasiva, siguiendo la orogenia Mioceno Superior / Plioceno inferior de la cadena de los Apeninos que forma la península italiana (Faccenna et al., 1997, 2001), Da lugar a la fusión parcial de una fuente de manto K metasomatizado, lo que da lugar a magmas hiperpotásica (por ejemplo, Conticelli y Peccerillo, 1992; Foley y Peccerillo, 1992; Serri et al., 1992).

Extensión de la espalda del arco se ha desarrollado esencialmente a lo largo NW-fallas normales y fallos de transferencia NE, que desmiembran o *desintegran* el cinturón orogénico, bloque hundido principalmente al oeste, es decir, hacia la cuenca Terranea (por ejemplo, Funicello y Parotto, 1978; Barberi et al., 1994). Grabens y horsts<sup>9</sup> se han llenado o se han cubierto con depósitos post-orogénico (*plioceno-pleistoceno*) de arcilla y arena de hasta 1000 m de espesor, y depósitos marinos y de transición, antes del inicio de la actividad volcánica subárea. datos geológicos y geofísicos integrados ilustran que por debajo de la cadena volcánica y de los depósitos clásticos la sucesión de carbonatos se extiende en el basamento cristalino, situado aproximadamente en 7 - 8000 m debajo de la superficie (por ejemplo, Parotto y Praturlon de 2004). Se cree que los principales cámaras de magma superficial que se encuentra en la base, o, dentro de la sucesión de carbonatos de Mesozoico -Cenozoico (por ejemplo, Barberi et al., 1981; De Rita et al, 1988a.; Trigila y De Benedetti, 1993; Barberi et al., 1994; Freda et al., 1997).

- ESTRATIGRAFÍA

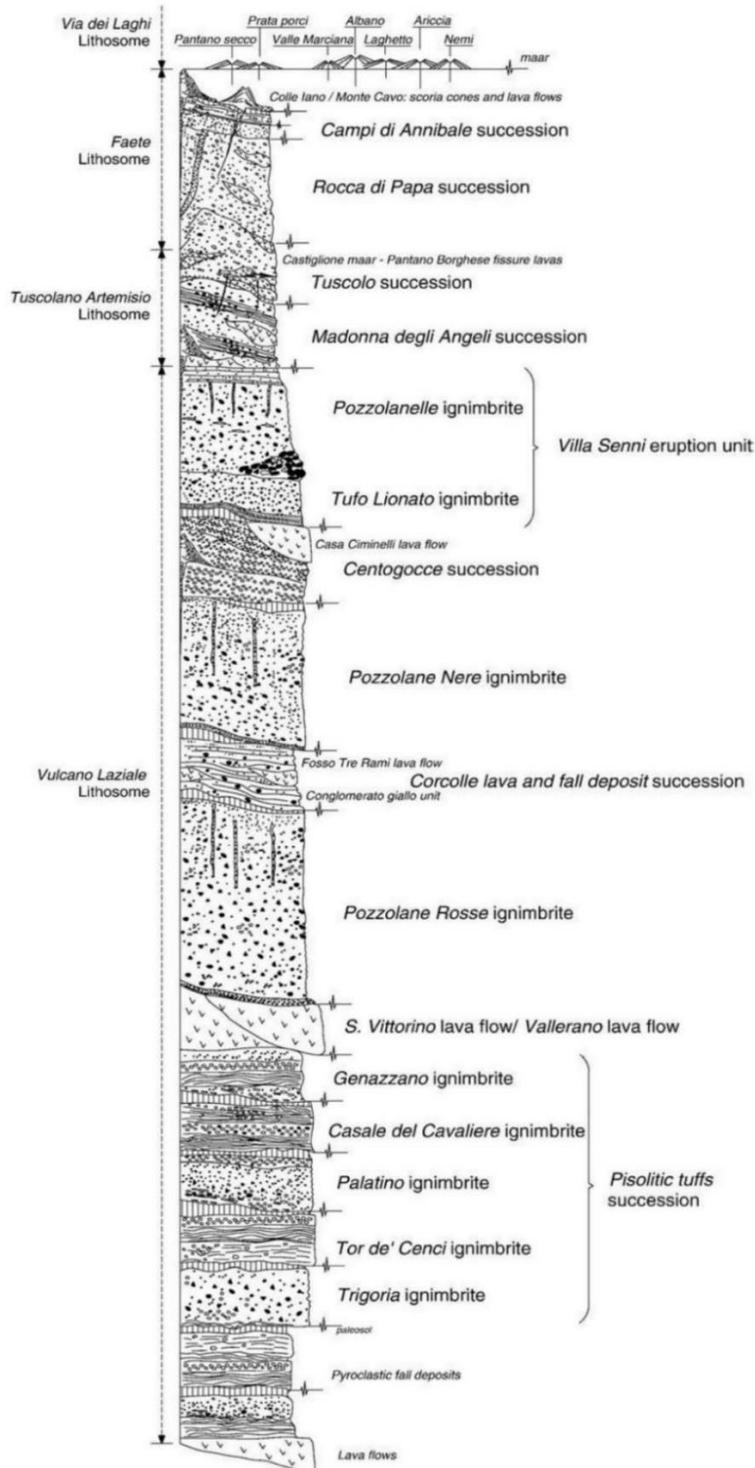
El informe [21] es un resumen del mapeo geológico de Roma Italia de escala 1:50.000 (Servicio geológico Nazionale-CARG), incluyendo toda la zona del volcán Colli Albani. Los litosomas que se reconocen son de mayor a menor: Vulcano Laziale litosoma, litosoma compuesto Tuscolano-Artemisio, litosoma Faete, litosoma compuesto Via dei Laghi, (*Ilustración 2*).

La organización de la unidad estratigráfica corresponde a un volcán complejo, como es el caso en la Colli Albani, este está relacionado con el espacio, e inherentemente diacrónico, litosomas y discordancia delimitada; presenta actividad volcánica de diferentes edificios que puede solapar en parte, lo que dificulta determinar (fases, períodos, etc.) estratigrafía, ya que para poder establecer con claridad las fases y periodos se requiere un único punto de erupción o turnos regulares con el tiempo de un centro a otro sin superposiciones.

---

<sup>9</sup> Graben y Horts: estructuras de bloques desplazados entre si conformando fallas normales e inversas respectivamente.

Ilustración 3. Compuesto columna estratigráfica de Colli Albani litosomas.



Nota: Recuperado de: [21], (Giordano, 2006), Pagina: 6.

## 8.2 INTERPRETACIÓN DEL CONTENIDO DEL DOCUMENTO [21].

El volcán Colli Albani, de conformidad con la interpretación de datos litológicos del material aflorante en la región corresponde a la evolución de la caldera, o sea la morfología depresiva resultante de desplome o colapso sucesivo del edificio volcánico configurado por la acumulación de material que sale a la superficie por procesos de erupciones sucesivas del volcán.

La composición del material consistentemente de caracteres mafico, en cuanto a que el contenido de  $SiO_2$  es menor del 50%, aunque la morfología y estilo eruptivo corresponde a material félsico. Después de la erupción del material que configura la caldera conformada por la unidad litológica denominada Villa Senni se generaron en esta caldera dos edificios volcánicos. Uno de forma de herradura el Tuscolano-Artemisio, se compone de conos de escorias relacionados a flujos de lava, y el volcán Faete; la ubicación de estos volcanes, adyacentes entre si sobre la misma superficie de la caldera preexistente, lateralmente son entre si coalescentes, o sea que pueden presentar superposición de productos emitidos en las erupciones de cada uno de ellos.

La última erupción volcánica, o sea posterior a la conformación de los dos volcanes anteriormente citados [21], es de actividad freatomagmatica, es decir la interacción de la salida de magma en presencia de agua, conformando lagos volcánicos y conos de ceniza, llamados litosomas Vía dei Laghi.

El edificio del volcán Tuscolano – Artemisio se formó sobre la superficie de la caldera de volcán Laziale, la cual se originó por procesos de subducción o hundimiento del material que configura la superficie que sirvió de base al volcán Laziale. Este hundimiento genero fracturas por donde transito magma y ocasiono la actividad magmática registrada en el volcán Tuscolano-Artemisio con diques en forma de anillo.

La última fase volcánica representada por el edificio volcánico de carácter freatomagmatico Vía di Laghi indica una fase de resurgimiento volcánico.

La estratigrafía registrada para el volcán Colli Albani corresponde a la organización de litosomas o edificios volcánicos definidos por reconocimientos morfológicos que se refiere a un centro eruptivo definido y a unidades estratigráficas limitadas discordantemente, o sea el resultado de la acumulación sucesiva de depósito del material volcánico o piroclastos, es decir unidades denominadas litosomas heterogéneas en cuanto a la forma y volúmenes.

El material volcánico que configura el Colli Albani caracteriza la provincia comagmatica Romana por bajo contenido de sílice y alto contenido de, contenidos químicos que definen el vulcanismo peri-terranceo cuaternario, o sea un vulcanismo típico del borde del mar mediterráneo en Italia.

Los estudios petrográfico reciente indican que las características del magma en Colli Albani están relacionada a procesos de descarbonización de carbonato que configuran la cámara magmática, la cual favorece la cristo-ligación de minerales como Leucita<sup>10</sup> y Clinopiroxeno<sup>11</sup>.

- ENTORNO GEOLÓGICO

El volcán Colli Albani hace parte de la cadena de volcanes de edad Pleistoceno reciente de tendencia composicional potasio-Alcaino, configurando el cinturón volcánico peri-terranceo. El vulcanismo anterior a esta edad es el vulcanismo potasio-cálcico-alcaino que dio origen a complejos riódacíticos, o sea a rocas ígneas volcánicas lávicas que contiene abundante cuarzo (20%-60%, según Streckeissen) y feldespatos potásico y plagioclasa ( es decir con contenido variable de Na y Ca), a complejos riolíticos, ósea rocas ígneas volcánicas lávica con contenido de cuarzo semejante al de las riódacitas pero con mayor contenido de feldespatos potásicos y menor de feldespatos plagioclasa que el de aquellos, aflorantes en cupulas submarinos.

El origen del vulcanismo en esta área ha sido debatido, especialmente respecto al alto contenido de potasio (K), se cree, debido a los procesos de extensión (*prolongación*) de la espalda de arco<sup>12</sup> después de la orogenia del Mioceno superior-Plioceno inferior de la cadena de los Apeninos que forma la península italiana; la orogenia es la ocurrencia de numerosos sismos de gran magnitud en un corto periodo de tiempo.

La orogenia citada ocasiono la fusión parcial del manto (corteza integrada por material ígneo de composición de sentencia básica), potásico metasomatizado, lo que da lugar a magmas hiper potásicos. La extensión de la espalda del arco se ha desarrollado esencialmente a lo largo de fallas normales y de transferencia que desintegran el cinturón orogénico, el bloque hundido al oeste, o sea hacia la cuenca terranea (mar mediterráneo).

Las estructuras de Graben y Horst resultados del tectonismo (*orogenia*) se han cubierto por depósitos de hasta 1000 metros de espesor de arcillas y arenas postorogenicos (Plioceno-pleistoceno) antes de que comenzara la actividad volcánica subárea. Bajo este complejo volcánico y de depósitos clásticos se registra una sucesión de carbonatos de edad cenozoica.

---

<sup>10</sup> Leucita: aluminosilicatos de potasio (AlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) [1].

<sup>11</sup> Clinopiroxeno: pertenecen al grupo de piroxeno cuya fórmula es R<sub>2</sub> (Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)" [1].

<sup>12</sup> Arco: Expresión morfológica de unidades de rocas volcánicas.

- ESTRATIGRAFÍA

El termino litosoma es de carácter morfo-estratigráfica que en terrenos volcánicos corresponde al denominado “Edificio volcánico”, o sea al cuerpo del volcán.

Los litosomas reconocidos en el Colli Albani son de mayor a menor: Litosoma volcán Laziale; litosoma compuesto Tuscolano- Artemisio; Litosoma Faete; Litosoma compuesto Vía del Laghi.

La configuración de la unidad estratigráfica (*columna estratigráfica*), es decir la relación de la unidad litológica con la unidad tiempo, describe la estratigrafía de un volcán complejo, ya que en el caso de Colli Albani la actividad volcánica de diferente edificio se traslapa parcialmente.

- LITOSOMA VOLCAN LAZIALE (VL)

Este volcán se caracteriza por presentar morfología tabular distribuida en la caldera central, conformada por ignimbritas, o sea por material volcánico de carácter piroclástico que configura fragmentos de roca denominada Tufo o Toba; estas ignimbritas se forman en el Colli Albani durante erupciones (*eventos*) rápidos y repetidos, intercalados con depósitos de cada de escoria, flujos de lava y depósitos vulcaniclastico<sup>13</sup>.

Las ignimbritas localizadas en la parte inferior del depósito registran características freatomagmaticas en forma de bloques de cenizas y Lapilli<sup>14</sup>; A este conjunto de material se le ha denominado como “ Sucesión de tobas piso líticas” las ignimbritas y depósitos que se superponen a la sucesión de tobas piso líticas están bien expuestas, hacia el extremo superior del conjunto de ignimbritas, estas registran predominantemente granulometría fina (*matriz*); están compuestos predominantemente de fragmentos finos de ceniza y fragmentos de cristales de minerales de Leucita, clinopiroxeno y biotita (*son silicatos de carácter ferromagnesiano*); el contorno de los fragmentos de tobas está conformado por escoria gris oscuro y de textura porfirítica o sea conformada por variados tamaños. Además, estas ignimbritas contienen Xenolitos o sea partículas de diferentes rocas.

---

<sup>13</sup> *Vulcaniclasticos: Material volcánico mezclado con fragmento de roca.*

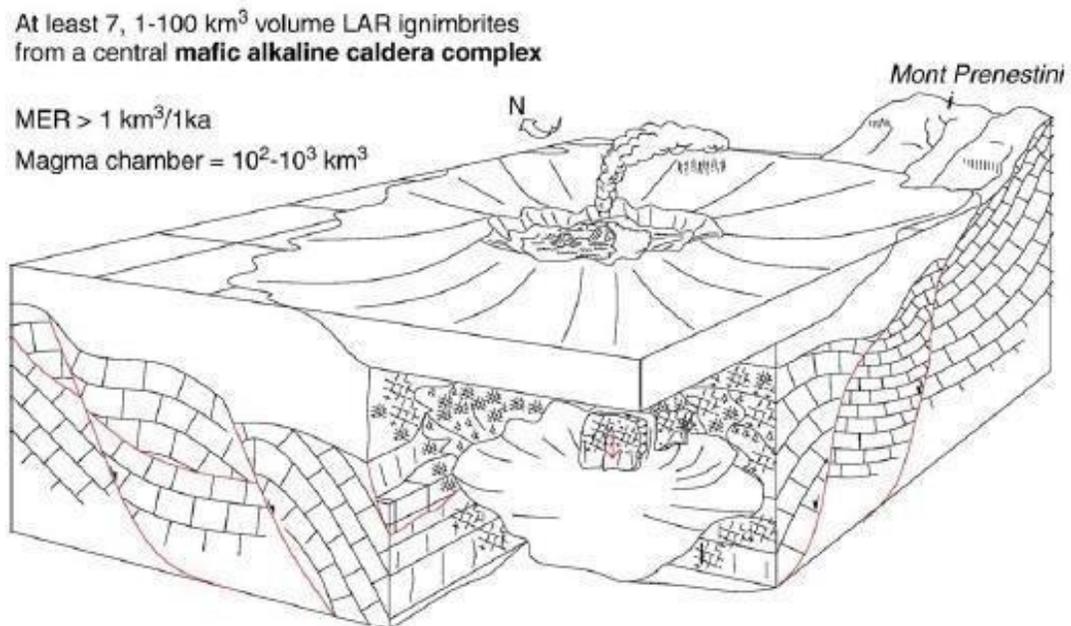
<sup>14</sup> *Lapilli: es una granulometría superior al tamaño ceniza o arena.*

- ESTRUCTURA DE LA CALDERA DEL VOLCAN LAZIALE

En la caldera se han registrado contrastes de altos y bajos gravimétricos, lo cual puede deberse al debilitamiento progresivo de la corteza por encima de la cámara magmática ya que se habían registrado varios procesos de colapso antes de la erupción; por lo tanto, es probable que el techo de la cámara magmática ya estaba fracturado en el momento de la erupción y que el colapso (*hundimiento*) diferencial de la caldera se produjera a lo largo de los bloques fallados y delimitados por fracturas.

El volumen de la cámara magmática es generalmente 10 veces el volumen de la ignimbrita, es por lo tanto el volumen de la cámara magmática del volcán Laziale puede tener un volumen ( $10^2 - 10^3 \text{ Km}^3$ ). La presencia de xenolitos carbonatados de diferente metamorfoseados térmicamente en la ignimbrita puzolana Rosse y de xenolitos de skarn (material metamórfico) en la ciudad de erupción Villa Senni, indican que la caldera posterior a la erupción pudo haber inducido al colapso o de las sucesiones carbonatadas Mesozoica- Cenozoica dentro de la cámara magmática. Se interpreta la litosoma caldera Laziale como una caldera compleja, similar a las calderas Campi Flegrei, Bracciano, Bulsena, Taupo y Yellowstone, o sea la construcción de un edificio volcánico por una caldera central y una meseta ignimbrita, caracterizado la recurrencia cíclica de erupciones rápidas de grandes volúmenes de ignimbritas y no como un estratovolcán como se creía anteriormente. El volumen del material que conforma el litosoma volcán Laziale es de  $300 \text{ Km}^3$  y fue formado en el periodo 561 Ka -355 Ka (Ka: miles de año).

*Ilustración 4. Reconstrucción de la estructura del litosoma Vulcano Laziale, (ca. 600–355 ka), caracterizada por una caldera fragmentaria central rodeada por una meseta ignimbrítica de 1600 km<sup>2</sup>. El volumen de la cámara de magma, alojado por rocas carbonáticas mesozoicas-cenozoicas, fue de aprox. 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> km<sup>3</sup>. El colapso progresivo involucró volúmenes significativos de carbonato asimilados en la cámara de magma. La actividad volcánica entre las erupciones paroxísticas estaba confinada dentro de la caldera del colapso.*

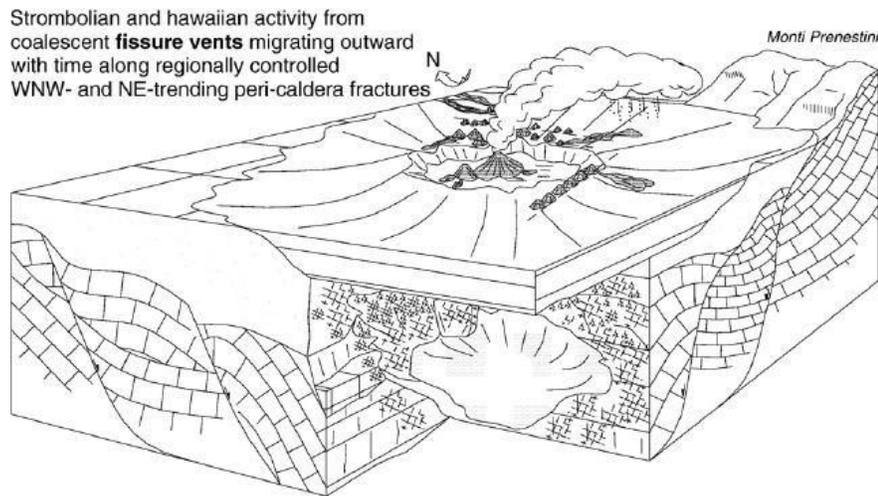


*Nota: Recuperado de: [21], (Giordano, 2006), Pagina: 12.*

- LITOSOMA VOLCAN TUSCOLANO-ARTEMISIO COMPUESTO: EL SISTEMA DE FISURAS PERICALDERA.

Este litosoma se localiza a lo largo del borde de la caldera configurando dos segmentos ortogonales entre sí, uno corresponde al Tuscolano y otro al artemisio. Litosoma Faete: estratovolcan.

*Ilustración 5. Reconstrucción de la estructura del litosoma de Tuscolano-Artemisio, entre ca. 355 y 260 ka. Después del colapso de la caldera de ignimbrites de Villa Senni a 355 ka, el piso de la caldera se sometió a una disminución continua, con una reducción significativa de la recarga de la cámara de magma. La deflación promovió la activación progresiva hacia afuera de las fisuras peri-caldera, controladas por la estructura del sótano.*



*Nota: Recuperado de: [21], (Giordano, 2006), Pagina: 18.*

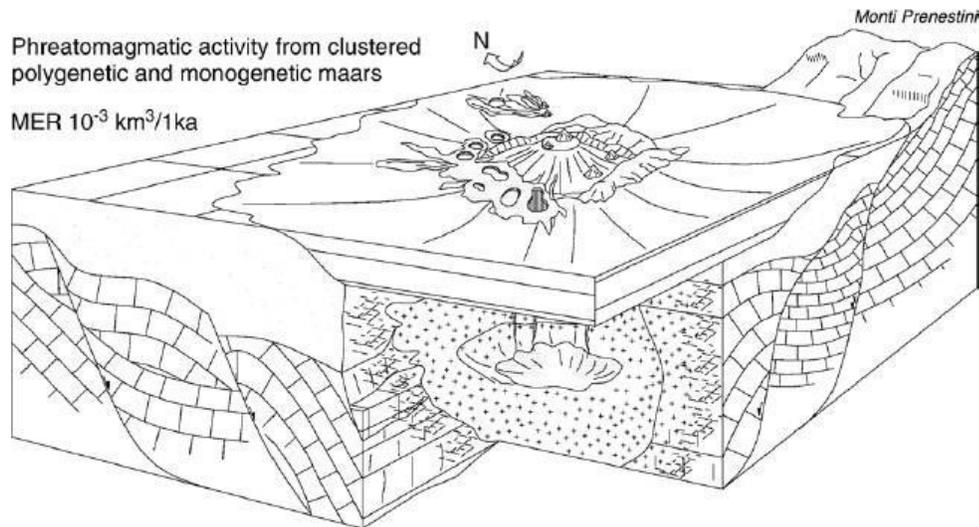
- LITOSOMA FAETE: ESTRATO VOLCAN.

En la misma superficie de la caldera donde se formó el volcán Tuscolano- Artemisio cambian se forma el litosoma Faete el cual está conformado por lavas, depósitos de escoria y de la caída de escoria soldadas; por consiguiente, este litosoma es de carácter efusivo, es decir integrado con rocas volcánicas lávicas a levemente explosivo. La presencia de discordancias, o sea interrupción en la acumulación espacial del material en la superficie, presencia de paleosuelos, o sea el registro de suelos antiguos sepultados por depósitos piroclásticos de rocas indican que el estrato cono Faete fue construido durante sucesivas fases de actividad e indican que la construcción del edificio Faete fue parcialmente simultánea con la construcción del edificio Tuscolano-Artemisio. El edificio Faete llena la caldera después del colapso de Villa Senni.

- LITOSOMA VIA DEI LAGHI COMPUESTA

Este litosoma incluye todos los productos freatomagmaticos y freáticos que ha caracterizado al Colli Albani; estos productos registran generalmente litofacies (ambientes de formación de litologías) comunes y distribuciones radiales de hasta 10 Km.

*Ilustración 6. Reconstrucción de la estructura del litosoma de la Via dei Laghi, (ca. 200 ka-Holoceno). La actividad se volvió excéntrica y se caracterizó por erupciones de formación de marte freatomagmático de pequeños volúmenes localizados sobre la horma carbonática sometida de Ciampino, que alberga un acuífero sustancial recargado en profundidad desde los Apeninos (Monti Prenestini). La cámara principal de magma se cristalizó principalmente en esta etapa.*



*Nota: Recuperado de: [21], (Giordano, 2006), Pagina: 20.*

## **9. CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA TEMÁTICA QUE INTENGA EL DOCUMENTO: “EL AGREGADO VOLCÁNICO DE MORTEROS ANTIGUOS ROMANOS DE LA COLINA CAPITOLINA: CRITERIOS PARA IDENTIFICACIÓN PETROGRÁFICA DE “PUZOLANA” DE ROMA E IMPLICACIONES HISTÓRICAS” [18].**

### **9.1 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO [18].**

Con los términos puzolana Romana se designa la petrografía o génesis, de las rocas volcánicas de las cuales proceden los materiales de morteros antiguos romanos. Se presenta un estudio petrográfico [18], o sea estudio de la composición mineralógica del material del depósito piroclásticos- florida utilizados para producir agregados de morteros (Puzolana Rosse, Puzolana Nere y puzolana); los piroclastos son fragmentos de material solido de tamaño arena-limos y gravilla emitidos en erupción volcánica.

También el estudio incluye la petrografía de fragmentos de roca de carácter volcánico denominado toba o tufo como son (tufo de palatino y tufo lionato) en la época romana.

“El conjunto de datos petrográficos se emplea para comparar y clasificar, a través de la observación en sección delgada en el microscopio óptico, complementado con análisis de elementos traza y análisis de la matriz vítrea en muestras arqueológicas la composición del agregado volcánico de 11 muestras de morteros de la antigua Roma recogidos de varias estructuras arqueológicas excavadas en la Colina Capitolina. Por medio de la identificación petrográfica y geoquímica combinada con criterios de cationes ilustrados en este trabajo. Se reconocieron dos tipos principales de morteros de agregados característicos de la republicano e imperial (estructuras), respectivamente, y un tercer tipo perteneciente a la época medieval” [18].

#### DESCRIPCIÓN DE LAS FORMACIONES DE LA CIUDAD DE COLINA CAPITOLINA.

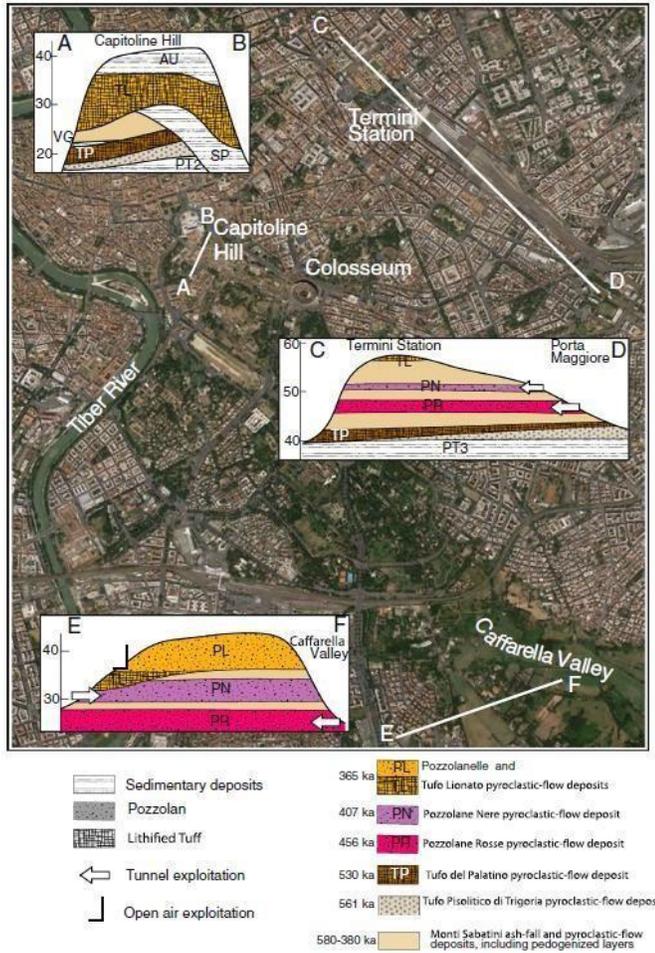
“Los piroclastos del depósito florida (*puzolana*) aflorantes en el distrito Colli Albani y extensivamente en la ciudad de Roma fueron explotados por los antiguos Romanos y para producir el agregado de morteros desde el desarrollo de la primera mampostería de hormigón a principios del siglo II (Marra et al, 2015). En particular, el uso selectivo de la Puzolana Rosse” [18].

“El depósito piroclástico- Florida (Jackson et al, 2007, 2010), de la erupción de edad  $456 \pm 4$  Ka ocurrió durante la fase explosiva del volcán Tuscolano – Artemisio (Marra et al, 2009; Freda et al, 2011) ya estaba a finales del siglo II antes de la era cristiana” [18].

“Solo los morteros de las primeras estructuras que todavía se conserva en roma (es decir: Pórtico de Emilia, templo de la Concordia, el templo de Castor y Pollux) no contiene “puzolana Rosse”, mientras que el uso alternativo de la integración de los otros dos principales depósitos de piroclastos puzolánico-Florida (Puzolana Nere y puzolana) que afloran en Roma solo se ha documentado, hasta el momento, desde el siglo segundo (Marra et al, 2015; Mogetta, 2015)”, [18].

“Todos estos depósitos piroclásticos- Florida deposito ocurren en el paleosuelo de la Ciudad separados por paleosuelos (figura 1), pero en este sector el más antiguo es Puzolana Rosse (PR), que muestra el mayor espesor (1-2 m) y la extensión lateral más continua respecto a los otros depósitos de cenizas y escoria, similares” [18].

Ilustración 7. El sustrato geológico de la ciudad Colina Capitolina.



Nota: Recuperado de [18], Marra, 2015, página 2.

“También el depósito Puzolana Rosse se caracteriza por presentar un menor grado de alteración de la componente vítrea de las escorias (Zeolitización); la puzolana Rosse aflora extensamente a través de una densa red de túneles excavados en el metro de Roma (Marra et al, 2015); hen efecto (Jackson et al, 2007, 2010)”, [18].

“Identificado las escorias rojas y lapilli negro (*granulometría mayor a la arena*) como la “rubra” y “nigra”, tipos de arena de cantera en el depósito de puzolana Rosse, descritos por el autor Vitruvius en el libro de arquitectura, que menciona los agregados de mejor calidad para los morteros” [18].

“La identificación de varios agregados volcánicos empleados en antiguos morteros romanos se ha logrado en el trabajo reciente utilizando diagramas de la relación de elementos seleccionados (Zr/ y Nb/Y, Zr/TiO<sub>2</sub> Vs Nb/TiO<sub>2</sub>, Th/Ta Vs Zr), superando las dificultades inherentes con las composiciones de elementos principales y la observación petrográfica en sección delgada (Marra et al, 2011, 2013,2015)” [18].

Los procesos de alteración química o meteorización pueden modificar drásticamente la composición química del material parental, imposibilitando la identificación de la procedencia de un agregado volcánico en el mortero a través de los principales análisis de elementos, también impidiendo la identificación de la mineralogía y textura de los fragmentos de roca por medio petrográfico.

“Los análisis en muchos casos, no diagnósticos de un producto específico. Por el contrario, las composiciones de elementos trazan permiten la discriminación (selección) entre los diferentes distritos volcánicos de Italia Central (por ejemplo, Peccerillo, 2005; Lustrino et al 2011), a menudo incluso la identificación de los diferentes productos (materiales) eruptivos (Marra et al, 2011, 2013; Marra y D’Ambrosio, 2013). Sin embargo, la integración con los métodos de análisis anteriormente mencionados se requiere para resolver los casos en que la composición de los elementos traza no es suficiente diagnóstico para identificar diferentes productos (por ejemplo, Marra et al 2014,2015; D’Ambrosio, 2015)” [18].

“Este puede ser el caso de la mayoría de los depósitos piroclastos- Florida OW explotados en la antigua Roma (*Tufo del Palatino: fragmento de roca de origen piroclástico, Puzolana Rosse, Puzolana Nere, Tufo Lionato*), para los cuales ocurre un cierto grado de superposición de las respectivas composiciones en los diagramas de elementos traza que los hace diferenciales. Mientras que el alto grado de alteración (*meteorización*) que afecta a los depósitos piroclásticos puede impedir encontrar cristales frescos (*inalterados*) en los que se podrían realizar análisis de identificación microscópica para la composición TAS (*Tusculano Artemisio*), identificación de las escorias de los diferentes productos se puede obtener a través de la observación petrográfica (composición mineralógica de una roca) detallada de fases minerales peculiares, característica de cada producto”[18].

“Por esta razón, en este trabajo se presenta un estudio petrográfico de los depósitos piroclásticos- Florida utilizados para producir agregados (puzolana Rosse, puzolana Nere y puzolana); así como piedras (*fragmentos de roca*): tufo del palatino y tufo lionato, comúnmente conocidos como “Cappellaccio” y “tufo<sup>15</sup> Rosso litoide” [18].

---

<sup>15</sup> Tufo: conformado por líticos o fragmentos de roca.

“Este conjunto de datos petrográficos se emplea para comparar y clasificar, a través de la observación en una sección delgada en el microscopio óptico, la composición del agregado volcánico de 11 muestras de morteros (tabla 3), recogidas de varias estructuras arqueológicas excavados en la Capitolina Hill (Ilustración 8)” [18].

*Tabla 3. Agregados morteros composición y cronología de inferidos.*

Mortar aggregates composition and inferred chronology.

Sample	Site	Structure	Composition	Type	Inferred age	Analysis	
						TE	EMP
TAB-1B*	TAB	foundation	TP	-	1 c BC, Sulla	TP	TP
TAB-1A	TAB	foundation	100%PR + TP	A	1 c BC, Sulla		TP
TAB-2	TJ	foundation rest	70%PR + 30%TL + TP	A	1 c BC, Sulla		
TAB-6	TJ	founding pillar	90%PR + TL	A	1 c BC, Sulla		
TAB-9	OT	platform	80%LV + PR	A2	late 1c BC		
TAB-3	TJ	fallen covering	PR	B	1 c AD, Domitian		
TAB-5	TJ	covering	PR	B	1 c AD, Domitian		
TAB-4	TJ	reinforcing pillar	PR	B	1 c AD, Domitian		
TAB-10	OT	platform	PR	B	1 c AD, Domitian		
TAB-11	VMT	platform	PR	B	1 c AD, Domitian		
TAB-7	PC	foundation	80%TL + PR	C	XVI c AD		TL
TAB-8	PC	foundation	TL	C	XVI c AD		TL

Legend: LV: Leucitic lava; TP: Tufo del Palatino; PR: Pozzolane Rosse; PN: Pozzolane Nere; TL: Tufo Lionato; PL: Pozzolanelle.

TAB: Tabularium; TJ: Temple of Capitoline Jupiter; OT: ex Ospedale Teutonico; VMT: Via di Monte Tarpeo; PC: Palazzo Caffarelli.

TE: Trace-element composition; EMP: Electron microprobe interstitial glass composition.

\* All samples with the exception of the tuff fragment TAB-1B (coarse aggregate) are represented by the fine aggregate separated from the lime matrix after HCl bathing.

*Nota: Recuperado de [18], Marra, 2015, página 4.*

Ilustración 8. a) vista de la Colina Capitolina con las estructuras de las muestras. b) detalle de muestreo en el Templo de Júpiter Capitolino.



Nota: Recuperado de [18], Marra, 2015, página 4.

“Por otra parte, se realiza análisis sobre el agregado del mortero de una muestra (TAB-2) recogida en el templo de Júpiter. El conjunto de datos de muestras naturales ha puesto en marcha los diagramas de discriminación de elementos traza para los productos de la fase tardía Tuscolano-Artemisio de la actividad integrada (registrada) en la literatura reciente (Farr et al, 2015; y las referencia en el) muestran en observaciones geoquímicas con análisis EMP (*Microsonda de electrones*) (apéndice 2), sobre vidrios volcánicos que se realizan en sección delgada de cuatro muestras arqueológicas” [18].

- DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS- FLORIDA DE FLUJO DE ROMA IDENTIFICADOS EN MORTEROS ANTIGUOS ROMANOS.

Las famosas siete Colina donde se construyó la ciudad de Roma representan los restos de una meseta volcánica erodada por el Río Tíber y sus afluentes durante los periodos medio y tardío del pleistoceno de la caída del nivel del mar (por el descenso del nivel del mar), (Marra y Rosa, 1995; Álvarez et al, 1996; Heiken et al, 2005). El sustrato geológico (*Ilustración 7*) está constituido por una serie agradacional (compleja de depósitos sedimentarios e intercalaciones de rocas piroclásticas, emplazadas principalmente entre 600 Ka y 280 Ka durante la actividad explosiva de los distritos volcánicos Colli Albani y Monti Sabatini (Marra et al; 2011).

Estos son parte de reacción magmática Romana (Peccerillo de 2005, y sus referencias), una caldera de volcanes en erupción ricos en potasio que se desarrollaron durante el pleistoceno medio en el margen del mar Tirreno de Italia (*Borde de mar Mediterráneo*). El Colli Albani (CA) productos de la gama en la composición K- Foidita a (Tefrita)<sup>16</sup> y (Tefrifonolita) (Trigolia et al, 1995; Marra et al, 2003; Freda et al, 2006; Gaeta et al, 2006; Boari et al 2009; Marra et al, 2009). Se caracterizan por una baja SiO<sub>2</sub> (≤45 wt %) y por un conjunto modal que consiste en clinopiroxeno y Leucita, con biotita<sup>17</sup> accesorio (*composición mineralógica del material, silicatos*). Sanidina<sup>18</sup> y plagioclasa<sup>19</sup> faltan, o extremadamente raro (*minerales que no están presentes o son extremadamente raros*), con la excepción del vidrio Sanidina- cojinete de Tufo Lionato (Gaeta, 1998). Cinco Calderas (*resultado morfología del colapso del edificio volcánicos*) que forman ciclos de erupción que ocurren durante la fase explosiva principal (Tuscolano- Artemisio, Marra et al, 1988,1995), con emplazamiento de grandes volúmenes de depósitos de piroclásticos- Florida (10 km<sup>3</sup>): Tufo piso lítico de Trigoria (561 ±2 Ka), tufo del palatino (530 ± 2Ka), Puzola Rosse (456 ±3 Ka) ( Marra et al, 2009), incluyendo esta última el tufo Lionato (lítica, de la unidad florida superior Freda et al, 1997). Tobas<sup>20</sup> líticas en los depósitos piroclásticos Florida que afloran en Roma y en sus alrededores fueron explotadas ampliamente desde el asentamiento humano temprano para producir piedras (*material grueso*) de construcción, mientras los depósitos de piroclastos florida (*Puzolana*) se mezclaron con cal, junto la piedra (*material grueso*) de los escombros que proviene del corte de tobas líticas<sup>21</sup> para producir morteros y hormigones, ya que el desarrollo de la mampostería ocurrió a finales del siglo 3 (Lugli, 1957; Jackson y Marra, 2006; Cifani, 2008; Mogetta, 2015).

<sup>16</sup> Tefita: piedras color gris ceniciento que solo tiene ese carácter común [1].

<sup>17</sup> Biotita: "Especie del grupo de las micas, de fórmula  $K(MgFe)_3(OH)_2[(AlFe)Si_3O_{10}]$ " [1].

<sup>18</sup> Sanidina: Feldespato de sosa con fórmula  $(K, Na)[AlSi_3O_8]$  [1].

<sup>19</sup> Plagioclasa: Cada uno de los feldespatos calcosódicos de las rocas volcánicas [1].

<sup>20</sup> Toba: fragmentos de rocas de origen piroclásticos.

<sup>21</sup> Tobas líticas: tobas o tufo con alto contenido de fragmento de roca.

- EL TEMPLO DE JÚPITER CAPITOLINA Y OTRAS ESTRUCTURAS DE LA COLINA CAPITOLINA.

“Desde el nacimiento de Roma, la Colina Capitolina ha representado un ajuste, lugar político sagrado y una ciudadela. Entre la gran cantidad de restos arqueológicos que atestiguan este papel, los más destacados son los del templo más grande e importante de la era pagana, voto a favor de la Triada Capitolina (Júpiter, Juno y Minerva). Este templo se reconoce comúnmente como Aedes Lovis Optimi Maximi Capitolinos.

(“El templo de la mejor, más grande, Júpiter Capitolino”); su construcción de la altura occidental del Capitolino- comenzó después de la votación de Tarquinio prisco (616 – 578 a.c), después de la victoria en la guerra contra los sabinos y se completó bajo Tarquino superbo. Sin embargo, el templo fue elegido solo después de la deposición rey, durante el primer año de la era de la Republica (509 ac) por consola Orazio Pulvillo.

Un gran cuidado fue dedicado al embellecimiento de este templo durante la época de la república, debido a la cada vez mayor importancia y respeto a que se a bordo de como testificado por la reconstrucción.

Después de un devastador incendio que destruyó por completo, en el 83 a.c, La reconstrucción se llevó a cabo por Sila y completado por consola Quinto Lutazio Catulo en el 69 a.ac. Las modificaciones de restauración introdujeron el empleo de nuevos materiales, lo que implica un reordenamiento de la estática del edificio. Por lo tanto, significo que se realizaron intervenciones cativas para reforzar y consolidar la plataforma original de 15.000 m2 realizados con bloques de Tufo del Palatino, a través de paredes de hormigón (Figura 2). El incendio del 83 también proporciono la oportunidad de realizar el reordenamiento arquitectónico de la parte de la colina frente al templo, el Asilo, donde la construcción de otro edificio monumento (La Tabularium, fue completado por el mismo Quinto Lutazio Catulo e el año 78 antes de Cristo. Fue un gran edificio fundado sobre una plataforma de hormigón de 3000 m2, que también sirvió como estructura de retención en la ladera sureste de la Colina Capitolina.

El Tabularium fue construido en tres niveles de piedra (roca)\* de dimensión arquitectónica, utilizando el tufo Lionato en las partes internas y los Gabinus lapis para los extremos.

Dos grandes incendios que se producen a pocos años el uno del otro afectaron de nuevo la Colina Capitolina y el templo de Júpiter Capitolino en el año 69 d.c y 80 d.c. La restauración del templo se llevó a cabo por el imperador vespasiano poco después del primer incendio,

Mientras que su reconstrucción después del segundo incendio fue iniciada por Tito, y rápidamente se completó por su sucesor Domiciano en el año 82 d.c. La zona frente y alrededor del Templo (“área capitolina”), que se extiende hasta el acantilado escarpado del suroeste de la Colina (“Rupe Tarpea”) fue ocupada desde la época Republicana por templos, santuarios, quizás y estatuas para adoración a la Tirada Capitolina. Grandes plataformas de concreto expuestas y parcialmente destruidas por las excavaciones realizadas a finales del siglo 19 en esta para realizar el \_ de la moderna rio di Monte Tarpeo, a lo largo de la cual, aun es visible una sección de este podio.

Nuevas excavaciones realizadas recientemente cerca del edificio del siglo 19 del espedaje tectónico “han expuesto a otra plataforma de concreto que se caracteriza por la misma orientación que la del templo de Júpiter Capitolino, cuya interpretación es todavía objeto de investigación que comprenda el estudio de varios bloques recuperados in-situ, que abarca el arcaico a través de la época republicana medio.

La disminución del templo de Júpiter Capitolino comenzó desde finales del siglo cuatro y sufrió la devastación durante el siglo V; no obstante, se sigue teniendo como una de las maravillas del mundo por el senador casidero en el siglo VI d.c.

Los restos del templo fueron cubiertos en la edad media por la construcción del Palacio de los conservadores ya en el siglo XVI del Palazzo o Caffarelli.

Sin embargo, las obras de ampliación de este edificio renacentista realizado en la reexposición parte de la plataforma de Toba del templo del siglo XVII trayendo de nuevo a la luz este destacado testigo del pasado” [18].

- LOS DATOS Y MÉTODOS
- TOMA DE MUESTRAS ARQUEOLÓGICAS

El estudio [18], se basó en la identificación de la composición de 11 muestras de morteros recolectadas de varias estructuras de hormigón, con el objetivo de examinar la naturaleza del agregado volcánico para determinar las diversas composiciones petrográficas de los morteros romano, cinco de las muestras analizadas fueron recogidas en el templo de Júpiter Capitolino durante tres intervenciones de restauración. Las muestras se recolecto en diferentes fases de construcción.

- ANÁLISIS DE ELEMENTOS TRAZA.

“Siete muestras a granel de rocas volcánicas recolectadas en el campo, a lo largo de con el componente volcánico separado por baño de HCl del agregado fino del mortero de una fase de restauración del Templo de Júpiter (muestra TAB-2), se analizaron la composición de oligoelementos en tres diferentes carreras en los laboratorios de activación, Canadá, por litio Metaborato / Tetraborato Fusion ICP-MS (Apéndice 1A-B-C). Muestra fusionada es diluido y analizado por Perkin Elmer Sciex ELAN 6000, 6100 o 9000 ICP / MS. Tres espacios en blanco y cinco controles (tres antes de la muestra grupo y dos después) se analizan por grupo de muestras. Se utilizaron técnicas para medir la pérdida por ignición (LOI) a 900 ° C. Internacional Se han utilizado patrones de roca para la calibración y la precisión. Es mejor que 5% para Rb y Sr, 10% para Ni, Zr, Nb, Ba, Ce y La, y 15% para los otros elementos” [18].

- ANÁLISIS DE MICROSONDA ELECTRÓNICA (EMP).

“Se utilizaron espectrómetros dispersivos de longitud de onda, que usaban un voltaje de aceleración de 15 kV, una corriente de haz de 10 nA, un tamaño de haz de 2  $\mu\text{m}$  y un tiempo de conteo de 10 y 20 s en el fondo y los picos, respectivamente. Se adoptaron los siguientes estándares para los diversos elementos químicos: jadeita (Si y Na), corindón (Al), forsterita (Mg) y andra (Fe), rutilo (Ti), ortoclasa (K), barita (Ba), celestina (Sr), F-flogopita (F), apatita (P), espesartina (Mn) y metales (Cr). La corrección de ZAF se usó para lograr concentraciones reales de elementos. La incertidumbre analítica relativa en las mediciones es <1.0%” [18].

- CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DE LOS DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS FLORIDA DE COLLI ALBANI.

Las características texturales y mineralógicas de las muestras de morteros recolectadas de las diferentes estructuras de hormigón del estudio [18] son descrita en la tabla 4.

*Tabla 4. Indica todas las características mineralógicas y textura de los monumentos estudiados.*

Unidad de disposición	Origen	Aspecto en el campo	Aspecto mineralógico de la textura				
			Textura	Grado de vesicular	Fenocristales	masa de tierra	Características
Puzolana	Deposito Florida	Partículas no consolidadas	IP= 5-20	Mínimo a moderado	Clinopiroxeno + leucita+magnetita+granito	criptocristales con microcristales de leucita redondeada	Alto IP, presencia de mica, clinopiroxenos y granito.
Tufo Lionato	Deposito Florida de flujo masivo	piroclasto de tamaño de ceniza consolidado	IP < 1	Moderado alargado a redondeados con Zeolita	Clinopiroxeno + Leucita + Sanidina	Aspecto vidrioso	Forma alargada
Puzolana nere	Deposito Florida y de escoria	Partículas masivas no consolidado	IP=1-5	Mínimo a moderado	Leucita clinopiroxeno + mica + nefelina	Criptocristales con microcristales de leucita con forma de estrella	IP asociado con mica, leucita y nefelina
Puzolana rosse	Deposito Florida y de escoria	Partículas no consolidadas	IP < 1	Pobre a moderado	Leucita + clinopiroxeno	Criptocristales con microcristales de leucita con forma de estrella	Muy bajo IP
Tufo de palatino	Oleada de piroclastos	Capas de cenizas	IP= 1-5	Redondeado a regular	Leucita + clinopiroxeno	Criptocristales de leucita con forma de estrella	Color marrón claro

*Nota: Recuperado de [18], Marra, 2015, página 7.*

- PUZOLANA

Una característica principal que permite identificar la Puzolana es el alto índice de textura porfídica (textura en la cual hay contraste de tamaños de minerales: fenocristales o se minerales muy grandes con relación a minerales muy pequeño), que es aproximadamente 13% en volumen en promedio (Freda et al, 1997). Por otra parte, el clinopiroxeno (silicato: Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Fe Mg)) de tamaño milimétrico, abundancia de mica<sup>22</sup> y ocurrencia de granate<sup>23</sup> (silicato).

<sup>22</sup> Mica: Forma parte de los granitos más antiguos [1].

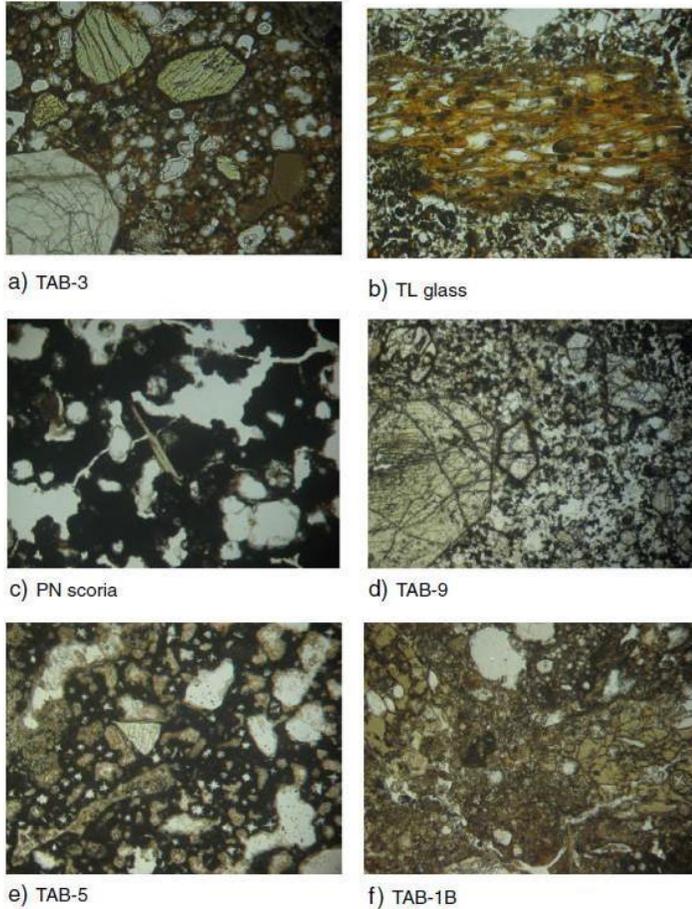
<sup>23</sup> Granate: "Cada uno de los minerales de un grupo que cristaliza en cubos y que contiene muchas especies distintas" [1].

- TUFO LIONATO  
Representado por clastos de escoria (*residuo de la combustión*) vítrea con evidencia de deformación plástica (Ilustración 9b) están frecuentemente asociados a la matriz ceolitizada, además el vidrio es frecuentemente de color naranja y alterado localmente en Zeolitas que en frecuencia están presentes en las vesículas (*cavidades en la roca*) [18].
  
- PUZOLANA NERE  
“Los clastos de escoria de Puzolana Nere muestran leucita fresca del tamaño de un milímetro, características de vesiculación y masa de tierra similares a las de Puzolana clastos de escoria (tabla 4). Los clastos de escoria de Puzolana Nere se caracterizan por menor índice de textura porfírica. Además, la mica se produce como fenocristales. La nefelina también puede presentarse ocasionalmente (Ilustración. 9c). Estas características, en particular, permiten distinguir la puzolana Nere de los clastos de escoria de Puzolana Rosse en los morteros romano” [18].
  
- PUZOLANA ROSSE  
“Los clastos de escoria de Puzolana Rosse son apenas de textura porfírica y contienen leucita, clinopiroxeno y xenocristales muy raros de olivino<sup>24</sup> (es decir, cristales casi completamente convertido en hidróxidos de hierro, Ilustración. 9d), y flogopita<sup>25</sup>. En general, la matriz es criptocristalina y se caracteriza por microcristales de leucita que muestran un hábito similar a una estrella. Digno de mención, esta última característica, unida al índice porfírico muy bajo, representa la huella digital de los clastos de escoria de Puzolana Rosse en los morteros de Monumentos romanos (Ilustración. 9e)” [18].
  
- TUFO DEL PALATINO  
“Los clastos de escoria de Puzolana Rosse son de textura porfíricos y contienen leucita, clinopiroxeno y xenocristales muy raros de olivino (es decir, cristales casi completamente convertido en hidróxidos de hierro, Ilustración. 9d), y logopita. En general, la matriz es criptocristalina y se caracteriza por microcristales de leucita que muestran un hábito similar a una estrella. Digno de mención, esta última característica, unida al índice de textura porfírico muy bajo, representa los clastos de escoria de la Puzolana Rosse en los morteros de Monumentos romanos (Ilustración. 9e)” [18].

<sup>24</sup> Olivino: Formula: ( $MgFe$ )<sub>2</sub>[SiO]<sub>4</sub>, [1].

<sup>25</sup> Flogopita: Mica de formula  $KMg_3[(F,OH)_2Al_3O_{10}]$ , [1].

*Ilustración 9. Fotomicrografías de clastos escoria que se producen en los morteros de los romanos y en los depósitos piroclásticos de Colli Albani.*



La dimensión horizontal de la foto (d) y de las fotos (a, b, c, e, f) son 2.5mm y 1mm respectivamente. (a) Leucita de tamaño milimétrico (esquina izquierda), clinopiroxeno verde (centro arriba) y mica (esquina derecha) en el altamente porfirítico Escoria de puzolanelle (muestra TAB-3). (b) Deformación plástica de las vesículas en la escoria vidriosa Tufo Lionato (muestra natural). (c) Escoria de puzolana de baja textura porfirítica de la puzolana (muestra natural) caracterizada por fenocristales de mica (centro). (d) Clasto lítico de lava caracterizado por la presencia de olivina oxidada (centro) asociada en la muestra de mortero TAB-9 con clastos de escoria Pozzolane Rosse. (e) Escoria de Pozzolane Rosse (muestra TAB-5) caracterizada por un índice porfirítico muy bajo (b1% en volumen) y microcristales de leucita que muestran un hábito similar a una estrella. El clinopiroxeno incoloro-verde claro también está presente (centrar). (f) Moldes de escoria vítrea de color marrón claro, con leucita y escasa vesiculada (izquierda y derecha) en la matriz de cenizas del Tufo del Palatino (muestra TAB-1B).

- OBSERVACIONES PETROGRÁFICAS DE MUESTRAS DE MORTERO
  - HORMIGÓN DE LA FUNDACIÓN TABULARIUM (TAB 1A / B).

A partir del análisis de trazas de elementos que realizó (Farr et al, 2015), se determinó que la muestra de hormigón de la fundación de Tabularium posee fragmentos de agregado grueso de tufo del palatino.

- Las restauraciones del templo de Júpiter Capitolino.
- PLATAFORMA DE HORMIGÓN DE LA FASE MÁS TEMPRANA DE RESTAURACIÓN (TAB-2).

El agregado de este mortero contiene fragmentos de vidrio de color marrón-naranja, escoria con estrellado de Leucita, fracción menor de clinopiroxeno y mica. Estos piroclastos son peculiares al litosoma de Villa Senni, según (Freda et al, 1997). Esta muestra de mortero se bañó con HCL (Ácido clorhídrico), separando la fracción más gruesa conformado por escoria gris, esta se analizó por oligoelementos validando una composición de Puzolana Rosse [18].

- PILAR DE HORMIGÓN (TAB-6).

En esta muestra de mortero se identifica fracción de Puzolana Rosse y fragmentos de Tufo Lionato (Ilustracion.10 c), [18].

- BLOQUE DE CUBIERTA DE LA PLATAFORMA (TAB-3).

El índice de textura porfídica es bajo, conformado por Puzolana Rosse rojo-gris oscuro y escoria con leucita estrellada (Ilustracion.10 e), [18].

- EL MANTENIMIENTO DE PILAR (TAB-4)

La muestra es obtenida durante el mantenimiento del pilar, las características de los fragmentos identificados por la sección delgada son de leucita estrelladas típico de puzolana Rosse y un bajo índice de textura porfídica (Ilustración. 10 g), [18].

- RECUBRIMIENTO DE LA PLATAFORMA DE TOBA (TAB-5)

Los agregados se identificó una textura porfídica baja conformada por Puzolana Rosse de tonalidad rojo-gris oscuro con leucita estrellado (Ilustración. 10 f), [18].

- EX “OSPEDALE TEUTÓNICO”, INFERIOR PLATAFORMA DE HORMIGÓN (TAB-9).

A partir del análisis de sección delgada en la muestra de mortero se puede identificar abundantes fragmentos de lava con leucita, clinopiroxeno, calcita, olivino, y nefelina en la matriz del mortero agregados producto de la erupción del Colli Albani (Trigila et al, 1995; Boari et al, 2009). “La fracción restante de agregado fino, en la proporción de 30%, está representado por escorias poco cristalino, con pequeños cristales de clinopiroxeno junto con cristales de leucita estrelladas” [18].

- EX “OSPEDALE TEUTÓNICO”, SUPERIOR DEL PEDESTAL DE HORMIGÓN (TAB-10).

“Las características macroscópicas de este mortero son características de varios morteros de la era imperial (Marra et al, 2014), con grandes escorias rojas y negras dentro de una matriz gris oscura (Ilustración. 10h). el agregado fino muestra Puzolana Rosse de tonalidad negro y roja, y escoria con leucita estrellada” [18].

- PLATAFORMA DE HORMIGÓN DE VÍA MONTE TARPEO (TAB-11).

“La muestra de este mortero se considera del periodo dominicano, además presenta características macroscópicas similar a los de TAB-20 (Ilustración. 10i). consistentemente; el agregado fino está completamente compuesto de puzolana Rosse de tonalidad rojo y negro, y escoria” [18].

- PALAZZO CAFFARELLI

“Los morteros tomados de las paredes de la sala VIII y la sala IX, son dos estructuras probablemente de edad del Renacimiento excavadas en la Colina Capitolina, esta muestra una composición muy diferente con respecto a todos los demás mortales analizados en este estudio. De hecho, el componente principal en ambos agregados está representado por fragmentos Tufo Lionato” [18].

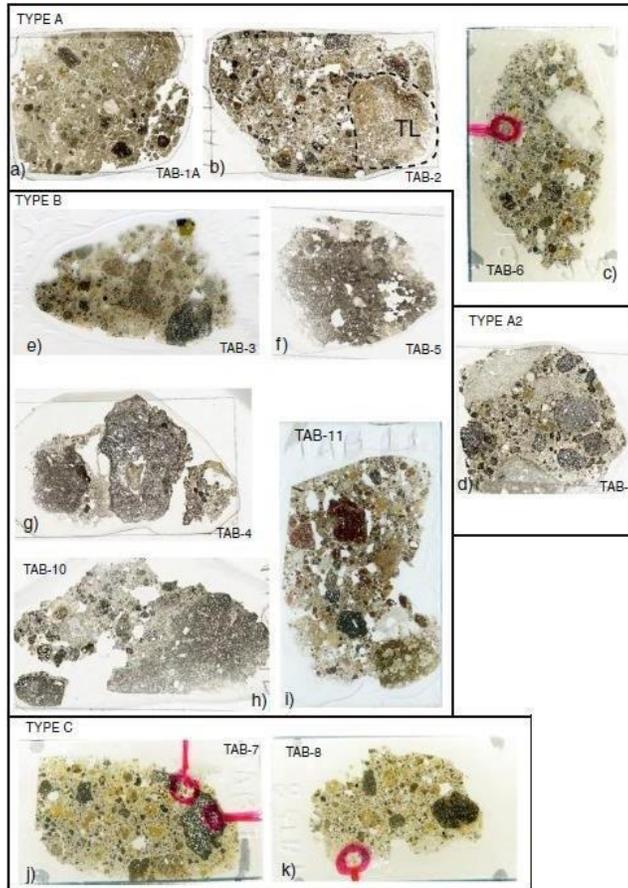
- SALA VIII (TAB-7).

“Las escorias de la puzolana Rosse conforma aproximadamente el 30% de agregado en el mortero romano el restante son fragmentos de Tufo Lionato (Ilustración. 10j)” [18].

- SALA IX (TAB-8).

“Los fragmentos Tufo Lionato constituyen la única fracción volcánica. Del agregado fino, en este mortero (Ilustración. 10k)” [18].

*Ilustración 10. Fotografías de secciones delgadas de muestras de mortero.*



*Nota: Recuperado de [18], Marra, 2015, página 9.*

- **OBSERVACIONES CONCLUYENTES**

“El estudio petrográfico, describe las características de textura y mineralógicas para diferenciar diferentes agregados volcánicos en Roma empleados en la mampostería de hormigón, primero se realizó un análisis de sección delgada por medio del microscopio óptico para identificar la composición del agregado. Los datos obtenidos permitieron una primera identificación de los diversos tipos de puzolana utilizadas como agregado para la producción de mortero romano durante la época Republicana hasta la era imperial” [18].

“Un segundo paso discriminatorio está representado por la evaluación química composición del vidrio volcánico, siempre que ocurra en las escorias de la sección delgada. Representan un método muy confiable de identificación y clasificación. En este ámbito, se recomienda la realización de secciones delgadas pulidas para el análisis de microsonda electrónica” [18].

“Finalmente, la identificación en sección delgada de uno o más tipos del componente volcánico es obligatorio para abordar la separación y selección de clastos escoria para someterse a análisis de elementos traza, siguiendo el procedimiento descrito en Marra et al. (2015), Que representa otro medio confiable de identificación mediante diagramas de discriminación, disponible para toda la Región Magmática Romana (Marra y D'Ambrosio, 2013; D'Ambrosio et al., 2015)” [18].

## **9.2 INTERPRETACIÓN DEL CONTENIDO DEL DOCUMENTO [18].**

Con la investigación petrográfica, o sea la identificación de la composición mineralogía de los materiales que configuran los depósitos piroclásticos Florida utilizados para producir agregados de morteros (Puzolana Rosse, puzolana Nere, como también los fragmentos gruesos del material volcánico (Tufo del Palatino y Tufo Lionato), se identifican los minerales que configuran el material citado, el cual es de edad geológicamente reciente. Esta información sirve para compararla con información del material de muestras arqueológicas descubiertas en la ciudad de Roma Colina Capitolina; la identificación de la composición de los agregados volcánicos que conforman las estructuras arqueológicas se obtiene mediante investigación en placas delgadas y a través del microscopio óptico, con análisis de elemento traza, como también con análisis de la matriz vítrea. Por esta identificación petrográfica y geoquímica se reconocen dos tipos principales de agregado de mortero característicos de las épocas de la Republica e Imperial y otro de la época medieval.

El material piroclástico de los depósitos producto de erupción volcánica, aflorante en el distrito Colli Albani y en otros lugares de la ciudad de Roma fue explotado para producir agregados de morteros por los Romanos en tiempos pasados. Los piroclastos del depósito Florida corresponden a la fase explosiva del volcán Tuscolano-Artemisio a finales del siglo segundo antes de la era cristiana.

Los piroclastos que conforman la unidad denominada “Puzolana Rosse” ha sido comúnmente utilizada excepto en las estructuras: Portico de Emilia, Templo de la Concordia, y el Templo Castor. Estructuras que aún se conservan.

Todos los depósitos piroclásticos Florida se registran en el subsuelo de la ciudad, pero el más antiguo es la "Puzolana Rosse", la cual registra espesor de 1 a 2 (m) y gran continuidad lateral características que la difieren, además menor alteración del componente vítrico de las escorias.

La identificación más precisa de agregados volcánicos empleados en antiguos romanos se ha logrado, recientemente, utilizando diagramas de discriminación (separación) basada en la relación de oligoelementos, o sea compuestos químicos conformados por mínimo número de elementos (Zr/Y Vs Nb/Y, Zr/ TiO<sub>2</sub> Vs Th/Ta); Superando las dificultades inherentes con las composiciones de elementos principales y la observación petrográfica en sección delgada. Puesto que los procesos de alteración geoquímica o procesos de meteorización pueden modificar drásticamente la composición original, impidiendo la posibilidad de identificar el material de donde proviene un agregado volcánico en el mortero por medio de los principales análisis de clasificación de elementos; lo mismo ocurre en la identificación del conjunto mineralógico y de la textura de los fragmentos de roca por medio de análisis petrográfico. Por el contrario, las composiciones de elementos trazan permiten la discriminación entre los diferentes distritos volcánicos de Italia central e incluso la identificación de diferentes productos eruptivos. Sin embargo, es necesaria la integración de los diferentes métodos de análisis citados para resolver los casos en los cuales la composición de elementos traza no es suficiente diagnóstico para discriminar diferentes productos; este puede ser el caso de la mayoría de los depósitos piroclásticos Florida explotados en la antigua Roma (Tufo Palatino, Puzolana Rosse, Puzolana Nere, Puzolana y Tufo Lionato).

- **DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS FLORIDA DE FLUJO DE ROMA IDENTIFICADOS EN MORTEROS ANTIGUOS ROMANOS**

La superficie colinada donde se construyó la ciudad de Roma representa la morfología de una meseta volcánica erodada por el río Tíber y sus afluentes durante los periodos medio y superior del pleistoceno; aflorante como consecuencia del descenso del nivel del mar. Esta meseta está conformada por una serie agradacional compleja de depósitos sedimentarios y rocas piroclásticas, emplazada principalmente en el periodo comprendido entre 600 ka y 280 ka (600.000 – 280.000 años) durante la actividad explosiva de los distritos volcánicos Colli Albani y Monti Sabatini, los cuales hacen parte de la región magmática Romana.

Durante el pleistoceno medio se desarrolló una cadena de volcanes en erupción, con productos ricos en potasio (K) en el borde del mar mediterráneo de Italia. Los productos del Colli Albani se caracterizan por tener bajo contenido de SiO<sub>2</sub> y minerales de tipo clinopiroxeno, Leucita y biotita (estos minerales son silicatos de carácter ferromagnesianos), pero no contienen minerales como Sanidina y feldespatos plagioclasa.

Durante la principal fase de erupción explosiva se forman cinco calderas volcánicas o sea superficies morfológicas resultantes del colapso de conos volcánicos; las calderas corresponden a ciclos de erupción depósitos piroclásticos Florida: Tufo piso lítico de Trigoria, Tufo Palatino, Puzolana Rosse, Puzolana, Puzolana Nere y Villa Senni.

Los depósitos piroclásticos Florida y todos que afloran en Roma fueron ampliamente explotados por los romanos para producir material de construcción, los depósitos de piroclastos Florida (Puzolana) y fragmentos de Tobas para producir morteros y hormigones.

A lo largo de la historia de la construcción de la ciudad de Roma se conocen grandes y emblemáticas estructuras arqueológicas como son las del Templo más grande e importante de la era pagana la Triada Capitolina (Júpiter, Juno y Minerva) y otras. Estas estructuras han sido semidestruidas por lo cual han tenido que ser sometidos a reconstrucción recuperándose sus características originales, [dominantemente por la ocurrencia de devastadores incendios registrados en varias épocas], proceso que ha requerido el uso de materiales como son Tufo Palatino y Tufo Lionato, entre otros.

- DATOS Y MÉTODOS

- TOMA DE MUESTRAS ARQUEOLÓGICAS

Se recogieron 11 muestras de morteros de estructuras de hormigón con el objeto de investigar la naturaleza del agregado volcánico que pueden permitir la identificación de diferentes tipos de composición, características de las diferentes fases de construcción y cronología de los morteros romanos. Se recogieron cinco muestras en el Templo de Júpiter capitolino en las estructuras que las fuentes históricas atribuyen a tres intervenciones de reestructuración diferentes, por Sila, Vespacianos y Dominaco. Estas muestras se recogieron en la plataforma de hormigón construida durante la fase temprana de restauración.

- ANÁLISIS DE ELEMENTOS TRAZA

Siete muestras de rocas volcánicas recogidas en el campo, junto con el componente volcánico separado por baño de ácido clorhídrico de un agregado de mortero de una fase de restauración del Templo de Júpiter, se analizaron para la composición de elementos traza en tres pruebas diferente.

- **CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DE LOS DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS FLORIDA DE COLLI ALBANI.**
  - **PUZOLANA**  
Las características que permiten distinguir la escoria puzolánica es el alto índice de textura porfiritica, es decir aquella que registra contraste de tamaños de los minerales; el contenido de clinopiroxeno verde (Silicato de carácter ferromagnesiano, abundante mica o sea silicatos ferromagnesianos o silicatos de aluminio y potasio.
  - **TUFO LIONATO**  
Los de origen reciente (geológicamente) representados vítreos; el vidrio es frecuentemente de color naranja.
  - **PUZOLANA NERE**  
Los clastos de escoria puzolana Nere son de tamaños milimétricos similares a los clastos de escoria puzolánica, pero en los clastos de la Puzolana Nere el índice porfídico es inferior.
  - **PUZOLANA ROSSE**  
Los clastos de escoria Puzolana Rosse son ligeramente porfídicos. La huella digital de los clastos de escoria Puzolana Rosse en los morteros de monumentos romanos la presencia de clinopiroxeno verde claro y calcita con caracteres diagnósticos de estos clastos.
  - **TUFO PALATINO**  
Este Tufo se produce como una ceniza gris claro relativamente endurecida. Observaciones petrográficas de muestras de Tabularum, muestran que el hormigón de la fundación de los cimientos de Tabularium se construyó con un agregado grueso hecho de pequeños fragmentos de Tufo del Palatino.

## **10. CAPITULO 3: CONSIDERACIONES GENÉTICAS DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL EN SUPERFICIE DEL MATERIAL PIROCLÁSTICO O PUZOLANICO Y DE SUS CARACTERÍSTICAS INGENIERILES.**

### **10.1 VULCANISMO.**

El vulcanismo es el resultado de la integración de procesos geodinámicos que originan salida de material natural ubicado en el subsuelo en la corteza terrestre relocalizándose sobre la superficie de ella.

El ducto de salida del material corresponde a discontinuidades espaciales o sea fracturas de la corteza (Volcán geológico); el material desplazado, de carácter magmático de comportamiento líquido y gaseoso, en su último recorrido para

alcanzar la superficie puede generar, por enfriamiento, partículas sólidas de granulometría fina (limo-arena-gravilla), conocido como cenizas volcánicas, Lapilli y bloques; parcialmente el material magmático puede alcanzar la superficie y allí por enfriamiento pasa a material sólido o sea roca volcánica. El conjunto de material que alcanza la superficie en forma de cenizas, lapilli, etc. Se denomina piroclásticos o material puzolánico, el cual representa un evento de erupción del volcán; Su acumulación forma depósitos llamados Litosomas.

La energía de salida del material a lo largo de la fractura es dependiente de las características químicas del magma ascendente, Los de carácter ácido a intermedio son de gran energía generando erupciones explosivas con emisión de piroclastos, los de carácter básico son de poca energía generando erupciones efusivas.

## **10.2 LOCALIZACIÓN ESPACIAL EN LA SUPERFICIE DE DEPÓSITOS PIROCLASTOS, LITOSOMAS.**

La posición espacial de los piroclastos en la superficie con relación a la ubicación del cráter del volcán es dependiente de varios factores, entre ellos la energía de la erupción, el tamaño de los piroclastos, de condiciones atmosféricas; factores que generan alguna selección granulométrica en los depósitos o litosomas y por consiguiente también generan distribución espacial, los depósitos de clastos más gruesos estarán más próximos al cráter del volcán, mientras que los de clastos más finos estarán a mayor distancia del punto en referencia.

La superposición espacial de depósitos de piroclastos o litosomas, cada uno de estos representando un evento eruptivo, configura el cuerpo o edificio volcánico o expresión morfológica del volcán.

Siendo los piroclastos una expresión de la erupción explosiva del volcán evidencian que el magma que los origina es de carácter químico de intermedio a ácido, de los cuales se van a formar minerales de tipo feldespatos de potasio (K-ortoclasa) a feldespatos plagioclasa predominantemente sódicos (Na-NaCa Albita- oligoclasa; clasificación de Streckeissen), acompañados o no de cuarzo (SiO<sub>2</sub>), y de mica Moscovita y parcialmente Biotita.

## **10.3 MORFOLOGÍA DEL EDIFICIO VOLCANICO.**

La forma del relieve configurado por la superposición de depósitos de piroclastos o litosomas es dependiente tanto de la continuidad de los procesos de erupción del volcán como de la severidad de los procesos de erosión, es decir de destrucción sobre el edificio volcánico. El proceso de caída de piroclastos sobre la superficie adyacente al cráter del volcán favorece una mejor distribución lateral sobre ella, generándose así, formas predominantemente tabulares a colinadas.

La forma y extensión de una superficie que recibe nuevos depósitos piroclásticos son características generadas por la intensidad y tipo de procesos erosivos; también son características de eventos de desplome del edificio volcánico a consecuencia de procesos de hundimiento o sea de subducción de la superficie sobre la cual se formó el edificio volcánico, en este caso la nueva superficie denominada caldera volcánica puede adquirir forma depresiva de límites periféricos de carácter curvilíneo, expresándose estas geo formas en el nuevo edificio volcánico que progresivamente se construye por el continuo proceso eruptivo del volcán.

#### **10.4 VULCANISMO-TECTONISMO.**

El fracturamiento de la corteza terrestre que favorece la salida de material magmático procedente del subsuelo. Alcanzando la superficie de esta corteza o sea configurándose el denominado volcán geológico, ha sido el resultado de procesos tectónicos de grandes magnitudes, donde la actividad geodinámica genera concentración y disipación de energía (terremotos) <sup>26</sup>, evidenciándose esta actividad en las fracturas mencionadas.

Las zonas de la corteza terrestre de mayor actividad sísmológica (generación de terremotos), corresponden a las denominadas zonas de subducción o sea de choque de placas tectónicas; por lo tanto, a lo largo de estas zonas de subducción se genera gran actividad volcánica expresada morfológicamente en la formación de edificios volcánicos alineados en la dirección de las zonas de subducción.

#### **10.5 PROPIEDADES INGENIERILES DE DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS “PUZOLANA”.**

Los depósitos piroclásticos son susceptibles a cambios en sus características de porosidad y permeabilidad especialmente en regiones tropicales húmedas. En depósitos muy recientes los depósitos por la naturaleza granular arenosa, registran permeabilidad, la cual progresivamente con el paso del tiempo geológico va siendo disminuida como consecuencia de la presencia de material arcilloso, producto de procesos de meteorización de minerales feldespáticos y ferromagnesianos, lo cual incrementa la porosidad del depósito, pero disminuye su permeabilidad; además con el incremento de granulometría arcillosa en el material del depósito en éste se modifican sus características de consistencia adquiriendo, progresivamente, mayor plasticidad.

---

<sup>26</sup> *Terremoto: Acumulación y disipación de energía, respecto a la teoría tectónica de placas- bordes convergentes.*

## **11. CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN NO EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN MATERIAL DE ORIGEN NATURAL CON RELACIÓN A SUS USOS INGENIERILES.**

Todo material en la naturaleza está conformado por elementos químicos que combinados entre si configuran minerales y estos configuran rocas, que de acuerdo a los procesos físicos-químicos que actuaron en su formación adquieren características física-químicas que se manifiestan físicamente en su consistencia, porosidad, permeabilidad; y químicamente por su susceptibilidad a su descomposición ; dando lugar a la formación de nuevos minerales, los cuales adquieren características físicas y químicas diferentes a las del material parental; por consiguiente al conocer la génesis de los diferentes materiales que configuran la corteza terrestre se descubren, cualitativamente, sus características físicas y de susceptibilidad a su descomposición química; así, los silicatos primarios de carácter ferromagnesiano de altas temperatura de formación (olivinos, según la serie de cristalización de Bowen), son de mayor inestabilidad química, y los de menor temperatura de formación.

Son los más estables químicamente (Cuarzo); los feldespatos son inestables químicamente, por descomposición generan minerales de tipo caolín (minerales arcillosos); los ferromagnesianos, por descomposición generan minerales arcillosos de tipo Montmorillonita; Las rocas ígneas volcánicas por presentar textura fina adquieren muy alta consistencia. En las rocas sedimentarias de carácter clástico (conglomerados - arenas, Lutitas) su consistencia depende del tipo de ligamento, las de mayor contenido de cemento son de mayor consistencia.

En las rocas sedimentarias de carácter químico su consistencia depende de la naturaleza química de los minerales que la conforman; así, la caliza es de menor consistencia que las Lutitas donde sus minerales presentan abundantes SiO<sub>2</sub>.

Los suelos residuales conformados predominantemente por minerales arcillosos, de tipo caolinita y/o montmorillonita presentan características de plasticidad diferentes de acuerdo con los minerales arcillosos dominantes en ellos.

La metodología de investigación de material natural con relación a sus usos ingenieriles requiere de un exhaustivo estudio genético y petrográfico; en rocas ígneas, además de los análisis mineralógicos y petrográficos se requiere identificación y análisis de las texturas que exhibe la roca y de la estabilidad química de sus minerales.

En rocas metamórficas su carácter genético regional de contacto o dinámico se revela en estructuras masivas y/o foliadas-gnéisicas y sus características ingenieriles (porosidad, permeabilidad, etc.), dependen del registro genético mencionado.

Siguiendo esta metodología de investigación no experimental de propiedades ingenieriles del material natural las pruebas físico-mecánicas de laboratorio constituyen la comprobación del comportamiento físico del material obtenido en la investigación no experimental y su cuantificación.

## 12. CONCLUSIONES.

- Del artículo [18], se concluye lo siguiente:
  - Las puzolanas o material piroclástico salido a la superficie por erupciones volcánicas han sido utilizadas como agregado en la construcción de morteros.
  - Los fragmentos de roca de tipo Toba o sea aquella conformada por material volcánico no lávico, asociada al material piroclástico han sido utilizados en la construcción de hormigones.
  - La identificación del uso de puzolana y fragmentos de tobas en los elementos estructurales de edificaciones de antiguos romanos como el Coliseo Romano, Panteón de Agripa y demás construcciones arqueológicas expuestas en la ciudad de Roma, Italia, revelan uno de los aportes de mayor importancia como es la mayor durabilidad de los hormigones antiguos, siendo evidente en general su mayor vida útil respecto del concreto moderno.
  - El conocimiento mineralógico y petrográfico del material de esos afloramientos es la base de su identificación en los agregados de morteros y hormigones que hacen parte de elementos estructurales de las edificaciones antiguas Romanas que aun después de más de 2000 años de haber sido construidos prevalecen en la actualidad.
  - Tanto las puzolanas como las tobas empleadas en las construcciones citadas en el artículo [18], han sido extraídas de la superficie colinada sobre la cual está asentada la ciudad de Roma.
  - Se han identificado varios tipos de puzolanas de carácter químico, mineralógico y de diferentes edades, las cuales corresponden a erupciones volcánicas ocurridas a lo largo del tiempo siendo por lo tanto de diferentes edades.
    - Del artículo [21] se concluyó lo siguiente respecto a la información geológica de la ciudad Colina Capitolina de Roma, Italia:
      - La frecuencia de la actividad volcánica en la región de Colli Albani (Italia) no fue homogénea, es decir ha sido de carácter intermitente.
      - El piso de la superficie que recibe lluvia de piroclastos emitidos en las diferentes erupciones del volcán ha evidenciado hundimiento o colapso progresivo, por consiguiente, los edificios volcánicos o sea el resultado de la acumulación de piroclastos configuran las denominadas calderas volcánicas.

- Del artículo [21] se concluyó lo siguiente respecto a las propiedades genéticas del material puzolánico del Volcán Colli Albani
- La principal caldera volcánica en la región Colli Albani ha sido formada por el colapso del edificio volcánico denominado “Volcán Laziale”; Sobre esta superficie se han formado dos edificios volcánicos adyacentes entre sí lateralmente, los volcanes Tuscolano-Artemisio y Faete, primero se construyó el Tuscolano -Artemisio.
- La subsidencia del volcán Laziale y generación de la principal caldera ocurre como consecuencia de hundimiento del techo de la cámara magmática que alimenta la actividad volcánica de la región.
- La cámara magmática se formó como una gran cavidad dentro de un conjunto de capas calcáreas; el magma que la ocupó pudo haber sido parcialmente alterado químicamente por la reacción con las calizas que conforma la cámara.
- La variedad de material emitido por las diversas erupciones del volcán ha configurado depósitos de piroclastos, depósitos denominados Litosomas, algunas de ellos aflorantes en la ciudad de Roma, de los cuales se explotaron los materiales utilizados en las construcciones de la antigua Roma.

### 13. RECOMENDACIONES

- Las investigaciones con respecto a las características del material pétreo como agregado empleado en la construcción, se sugiere basarse principalmente en una investigación técnico-científica, que posteriormente se debe comprobar por métodos experimentales.
- Es importante investigar a futuro para Colombia la factibilidad de uso de las puzolanas de origen volcánico en la producción de concreto en planta y en proyectos de construcción, ya que es evidente la bondad de las puzolanas como material de construcción teniendo como base fundamental conocer su génesis.
- En Colombia se debe investigar el uso de puzolanas de origen volcánico en las construcciones ya sea en las precolombinas, o en la construcción tradicional bahareque, adobe y demás patrimonio constructivo para mejorar y así mismo implicar en beneficios económicos y técnicos de ser posible; A partir de conocer la génesis del material se podrá saber con anticipación su comportamiento.
- El uso de puzolanas, cenizas y tobas en la historia se centra en Europa (Italia y cercanías) por parte del antiguo imperio romano, se recomienda que se hagan investigaciones respecto a su aplicación en otras latitudes y épocas, para aprender de su uso y viabilizar de manera sostenible de ser posible su uso actual, especialmente para las zonas cercanas a volcanes en Colombia (Nariño, eje cafetero, costa pacífica y a lo largo de la Cordillera Occidental).

## 14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Novo de pedro & F. Chicarro, 1957. Diccionario de geología y ciencia afines. Barcelona, Madrid, Buenos aires, Rio de Janeiro, y México. Labor.
- [2] Faick, J.N. (1963). Geology and technology of some natural pozzolans in North Central California. *Economic Geology*.
- [3] Labbaci, Y., Abdelaziz, Y., Mekkaoui, A., Alouani, A., & Labbaci, B. (2017). The use of the volcanic powders as supplementary cementitious materials for environmental-friendly durable concrete. *Construction and Building Materials*.
- [4] Cavdar, A & Yetgin, S. (2007). Availability of tufts from northeast of Turkey as natural pozzolan on cement, some chemical and mechanical relationships. *Construction and Building Materials*.
- [5] Pourkhorshidi, A. R., Najimi, M., Parhizkar, T., Jafarpour, F., & Hillemeier, B. (2010). Applicability of the standard specification of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*.
- [6] Parhizkar, T., Najimi, M., Pourkhorshidi, A. R., Jafarpour, F., Hillemeier, B., & Herr, R. (2010). Proposing a New Approach for Qualification of Natural Pozzolans. *Scientia Iranica*.
- [7] Moropoulou, A., Aggelakopoulou, E., & Bakolas, A. (2004). Evaluation on pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochimica Acta*.
- [8] Türkmenoğlu, A.G., & Tankut, A. (2002). Use of tufts from central Turkey as admixture in pozzolanic cements Assessment of their petrographical properties. *Cement and Concrete Research*,
- [9] Siddique, R. (2012). Properties of concrete made with volcanic ash. *Resources, Conservation and Recycling*.
- [10] Habert, G., Choupay, N., Montel, J.M., Guillaume, D., & Escadeillas, G. (2008). Effect of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity. *Cement and Concrete Research*.
- [11] Medina, G., del Bosque, I.S., Frías, M., Sánchez, M.S., & Medina, C, et al. (2017). Mineralogical study of granite waste in a prozzolan / Ca (OH)<sub>2</sub> system: Influence of the activation process.
- [12] Binici, H., Temiz, H., & Kose, M.M. (2007). The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice. *Construction and Building Materials*.
- [13] Maghsoudi, A.A. & Moghadman, H.A. (2016). Properties assessment of concrete containing Sirjan Pozzolan. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- [14] Díaz, Loya, I., Juenger, M., Seraj, J., & Minkara, R. (2017). Extending supplementary cementitious material resources: reclaimed and remediated fly ash and natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*.
- [15] Uzal, B., & Turanli, L. (2003). Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans. *Cement and concrete Research*.
- [16] Asocreto- Asociación Colombiana de productores de concreto. 2014. Tecnología del concreto. Bogotá, Colombia. ASOCRETO.

- [17] Norma Técnica colombiana (31), 1982, Cemento definiciones.
- [18] Marra Fabrizio, Denti Alberto & Gaeta Mario. 2015. El agregado volcánico de los antiguos morteros romanos de Colina Capitolina: Criterios petrográficos para la identificación de las "puzolanas" de Roma e implicaciones históricas. Roma, Italia. Elsevier.
- [19] Mehta, Kumar. 2001. El concreto puede ser duradero y respetuoso del medio ambiente. ACI-INT. Bill Semioli, editor jefe y editor asociado.
- [20] Mehta, Kumar. 2002. Ecologización de la industria del hormigón para un desarrollo sostenible. Editorial Wyco.
- [21] Giordano, Benedetti, Diana, Diano, Gaudio, Marasco, Miceli, Mollo, Cas & Funicello. 2006. The Colli Albani mafic caldera (Roma, Italy) Stratigraphy, structure and petrology. Elsevier, journal of volcanology and geothermal research.
- [22] Tarbuck, E. J.; Lutgens, F. K., y Tasa, D. 2005. Ciencia de la Tierra. Madrid, España. Editorial: Pearson Educación S.A.
- [23] Vich Rosa, Gomez Davi. (2010). Problemas de Geología estructural. Madrid, España. Departamento de Geodinámica Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
- [24] Salamanca Correa, R. (2001). La tecnología de los morteros. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 11, 41-48. <https://doi.org/10.18359/rcin.1353>.