

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía



**Estudio de las características geológicas
y tecnológicas de las materias primas
para el suministro de áridos en
Medellín, Colombia**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Héctor Mario Maya Sánchez
Ingeniero Geólogo

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior
de Ingenieros de Minas y Energía

**Doctorado en Investigación, Modelización y
Análisis del Riesgo en Medio Ambiente**

**Estudio de las características geológicas
y tecnológicas de las materias primas
para el suministro de áridos en
Medellín, Colombia**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Héctor Mario Maya Sánchez

Ingeniero Geólogo

Bajo la dirección de:
Dr. José Luis Parra y Alfaro

Madrid, 2024

Título: Estudio de las características geológicas y tecnológicas de las materias primas para el suministro de áridos en

Medellín, Colombia

Autor: Héctor Mario Maya Sánchez

Programa de Doctorado: Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo en Medio Ambiente

Dirección de tesis:

Dr. José Luis Parra y Alfaro, Profesor Titular, Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Revisores externos: <borrar este texto para dejar este apartado en blanco>

Tribunal de tesis: <borrar este texto para dejar este apartado en blanco>

Fecha de defensa: <borrar este texto para dejar este apartado en blanco>

Esta tesis ha sido financiada por la Unión Europea en su Programa ALFA – América Latina Formación Académica, por el Programa CYTED y por el Servicio Geológico Colombiano.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Liliana y a Oriana.

Su amor y compañía siempre han sido mi gran apoyo.

Agradecimientos

Le doy mis más sinceros agradecimientos:

A la Universidad Politécnica de Madrid por aceptar mi ingreso a su Escuela de Minas y Energía.

A la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía por su aceptación y hospitalidad en mi tiempo de estudio.

Al Servicio Geológico Colombiano por autorizar mi comisión de estudios en España y apoyar el trabajo de investigación en oficina, campo y laboratorios.

Al profesor Benjamín Calvo por su generosidad y apoyo durante mi estancia universitaria en Madrid.

Al profesor José Luis Parra por su dirección en la tesis doctoral.

A los profesores Ricardo Castroviejo y José Antonio Espí y a los geólogos Manuel Lombardero y Manuel Regueiro en España.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y sus autoridades por su generosidad al compartir conmigo una beca universitaria.

A los profesores Fernando Perales y César Cánepa de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

A los geólogos Francisco Sánchez y Cristina Vélez por su apoyo en los recorridos de campo y trabajos de oficina y a los ingenieros Ignacio Patrón y Sebastián González por la asistencia en GIS.

Abstract

Aggregate sources in the area of influence of the city of Medellín, Colombia, have been experiencing a significant decline due to the depletion of their resources and reserves and land use policies in territorial planning. Sands are a very abundant resource, but their location competes with urban development and therefore requires geological recognition and technological characterization to make adequate use of these resources.

The objective of this study is to identify and assess the potential sources of aggregates for the construction industry in the area of influence of the city of Medellín, to carry out a lithological characterization in the field and to carry out laboratory tests to determine the preliminary physical and chemical behavior of the rocks in the lithostratigraphic units exposed in the area. Determine the supply and demand situation of aggregates in the face of the advance of urban growth in buildings, recreation centers and road projects and interconnection between municipalities.

The study made it possible to characterize sources of sand and gravel in the unconsolidated deposits located in the channels and terraces of the Cauca River and its main tributaries. The physical weathering of granitic rocks has generated sands, especially in rocks of the Antioquia Batholith, Amagá Stock, La Miel Gneiss and Altavista Stock. The layered rocks of the Amagá Formation and the Combia Formation present materials with the potential to be used as sands and gravels. The results made it possible to define the preliminary physical and chemical quality of these rocks and evaluate their potential as raw material for use as aggregates in the construction industry. On the other hand, the state of mining and environmental regulations related to the use of natural aggregates was synthesized and the state of the supply and demand of aggregates in the last decade for the research area was summarized.

This work seeks to serve as a tool to focus on the use of aggregates as a natural resource, with the preliminary identification of their technological characteristics and the geological distribution of these potential resources. In addition, it is expected that it will be useful for governmental authorities to make decisions on land use policies and on the appropriate use of natural resources in the face of the requirements of growth and demand for these materials and the correct urban development.

Resumen

Las fuentes de áridos en el área de influencia de la ciudad de Medellín, Colombia, han estado experimentando una disminución significativa debido al agotamiento de sus recursos y reservas y a las políticas sobre el uso del suelo en la planificación territorial. Esta situación ocurre igualmente en una gran parte de los países del mundo, especialmente, en vías de desarrollo. Los áridos son un recurso muy abundante, pero su localización compite con el desarrollo urbanístico y por lo tanto requieren de un reconocimiento geológico y caracterización tecnológica para hacer un uso adecuado de estos recursos.

El objetivo de este estudio es identificar y valorar las fuentes potenciales de áridos para la industria de la construcción en el área de influencia de la ciudad de Medellín, realizar una caracterización litológica en campo y hacer ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento preliminar físico y químico de las rocas en las unidades litoestratigráficas expuestas en la zona, para con todo ello determinar la situación de oferta y demanda de los áridos frente al avance del crecimiento urbano en edificaciones, centros de recreación y proyectos de vías e interconexión entre los municipios.

El estudio permitió caracterizar fuentes de arenas y gravas en los depósitos no consolidados localizados en los cauces y terrazas del río Cauca y de sus principales afluentes. La meteorización física de rocas graníticas ha generado arenas, especialmente, en rocas del Batolito Antioqueño, Stock de Amagá, Gneis de la Miel y Stock de Altavista. Las rocas estratificadas de la Formación Amagá y de la Formación Combia presentan materiales con potencial para ser utilizados como arenas y gravas. Los resultados permitieron definir la calidad física y química preliminar de estas rocas y evaluar su potencial como materia prima para su uso como áridos en la industria de la construcción. De otro lado, se sintetizó el estado de la normativa minera y ambiental relacionada con el aprovechamiento de los áridos naturales y se resumió el estado de la oferta y demanda de áridos en la última década.

Este trabajo busca servir como herramienta para enfocar el uso de los áridos, como recurso natural, con la identificación preliminar de sus características tecnológicas y la distribución geológica de estos potenciales recursos. Además, se espera que sea útil para que las autoridades del Estado colombiano tomen decisiones sobre las políticas de ordenación territorial y sobre el uso adecuado de los recursos naturales ante los requerimientos de crecimiento y demanda de estos materiales y el correcto desarrollo urbanístico.

Tabla de Contenido

Abstract	vi
Resumen	vii
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xii</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xv</i>
<i>Abreviaturas y Acrónimos</i>	<i>xvii</i>
1. Introducción	19
1.1 Motivación	19
1.2 Objetivos	22
1.3 Localización del área de investigación	22
2. Antecedentes	25
2.1 Definiciones	25
2.2 Estudios previos	26
2.3 Marco normativo para el uso de áridos en Medellín	31
2.3.1 Normas técnicas empleadas	31
2.3.2 Especificaciones para los áridos de hormigón	32
2.3.3 Ensayos sobre los áridos para carreteras	35
2.3.4 Especificaciones de los áridos para carretera	37
2.3.5 Áridos para mampostería	38
2.3.6 Normativa ambiental	39
2.4 Tipos de yacimientos de áridos naturales	42
2.4.1 Arenas y Gravas	42
2.4.2 Árido de machaqueo	43
2.5 Estado de la tecnología de explotación de los áridos en Medellín	46
2.5.1 Tipos de explotaciones y maquinaria	46
2.5.2 Transporte de áridos en Medellín	50
3. Métodos y Materiales	52
3.1 Metodología	52
3.1.1 Compilación de información	52
3.1.2 Levantamiento de información en el campo y muestreo de materiales	53
3.1.3 Ensayos de laboratorio	54
3.1.4 Procesamiento de la información	60
3.1.5 Estructuración informática del producto	62
3.2 Muestreo de materiales	62
3.2.1 Estratos de arena y grava	65
3.2.2 Macizos rocosos y estratos de arena	65

3.2.3 Macizos rocosos para áridos de machaqueo	66
4. Marco geológico	67
4.1 Cinturón al Este de la Falla Silvia-Pijao	67
4.2 Cinturón entre la Falla Silvia-Pijao y la Falla San Jerónimo: Rocas Sedimentarias y Volcánicas del Cretácico	71
4.3 Cinturón entre la Falla de San Jerónimo y la Falla Cauca-Almaguer	71
4.4 Cinturón al oeste de la Falla Cauca-Almaguer	74
5. Caracterización y valoración de las unidades litoestratigráficas como fuentes de áridos	77
5.1 Depósitos no consolidados para arenas y gravas	77
5.1.1 Sector de Santa Fe de Antioquia – Sopetrán	77
5.1.2 Sector de Bolombolo	88
5.1.3 Sector de San Pedro - Belmira	89
5.1.4 Sector del Valle de Aburrá	90
5.2 Depósitos no consolidados para arenas	92
5.2.1 Sector de Santa Fe de Antioquia – Sopetrán	92
5.2.2 Sector de Bolombolo	94
5.3 Rocas estratificadas con arenas y gravas	95
5.3.1 Formación Amagá	97
5.3.2 Formación Combia (Miembro Sedimentario)	102
5.4 Macizos rocosos para arena y grava	103
5.4.1 Stock de Amagá	104
5.4.2 Gneis de la Miel	105
5.4.3 Batolito Antioqueño	106
5.4.4 Stock de Altavista	107
5.5 Rocas ígneas para áridos de machaqueo	108
5.5.1 Material Satisfactorio – Nocivo AS (Álcali – Sílice)	108
5.5.2 Material Aceptable – Nocivo AS (Álcali – Sílice)	113
5.5.3 Material Aceptable – Nocivo PL (Partículas Livianas)	118
5.5.4 Material Pobre – Nocivo (PL)	123
5.5.5 Material Pobre – Inofensivo	124
5.6 Rocas metamórficas para áridos de machaqueo	125
5.6.1 Material Aceptable – Nocivo AS-PL	125
5.6.2 Material Pobre – Nocivo PL	132
6. Síntesis de la oferta y la demanda de áridos en Medellín	137
6.1 Análisis de la oferta de gravas para Medellín	137
6.1.1 Producción nacional de gravas en el período 2016-2022	137
6.1.2 Producción de gravas en el área de influencia de la ciudad de Medellín	138
6.2 Análisis de la oferta de arenas para Medellín	141

6.2.1 Producción nacional de arenas reportada para regalías en el período 2016-2022.....	141
6.2.2 Producción de arenas en Medellín (Área Metropolitana del Valle de Aburrá).....	141
6.3 Demanda de materiales. Construcción de edificaciones en Medellín (2016 – 2022)	143
6.4 Alternativas de oferta y demanda a corto plazo (2023 – 2026) para vías de transporte	146
7. Retos, restricciones y propuestas para el desarrollo del suministro de áridos en Medellín	148
7.1 Gestión de los pasivos mineros generados por la explotación y tratamiento de los áridos.	148
7.3.1 Estado de la legislación colombiana	148
7.3.2 Manejo técnico desde los servicios geológicos.	150
7.2 Planes de rehabilitación de los espacios mineros una vez terminado el ciclo de explotación.	151
7.2 Recomendaciones para el desarrollo para la industria de los áridos en Medellín, Colombia	153
8. Discusión	156
9. Conclusiones	162
Anexos	165
Anexo 1. Mapa de unidades potenciales para áridos al occidente de Medellín, Colombia. Archivo “MMaya_2024_TesisDoc_Anex1.zip”	165
Anexo 2. Artículo publicado. Maya, M.; Parra, J.L.; Calvo, B. Exploration of Natural Aggregates for a Sustainable Construction Industry in Western Colombia. Minerals 2023, 13, 1430. https://doi.org/10.3390/min13111430	165
Referencias	166

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Panorámica de la ciudad de Medellín.</i>	20
<i>Figura 2. Interconexión urbana sobre el río Medellín.</i>	21
<i>Figura 3. Ubicación del área de estudio al oeste de Medellín (rectángulo blanco).</i>	23
<i>Figura 4. Localización de las poblaciones en el área de investigación. Área achurada: zona urbana de Medellín. Vías: líneas dobles y sencilla de color naranja, ríos y corrientes de agua: línea azul, poblaciones: cuadrado negro.</i>	24
<i>Figura 5. Extracción de material para áridos en el norte de la ciudad de Medellín.</i>	28
<i>Figura 6. Arriba: Planta de Canteras de Colombia, autopista Medellín – Rionegro. Abajo: Transporte interno del agregado.</i>	47
<i>Figura 7. Planta de áridos y cemento del Grupo Argos.</i>	48
<i>Figura 8. Planta de Triturados Peñalisa, Salgar, Antioquia, distancia a Medellín: 75 km.</i>	48
<i>Figura 9. Cantera de áridos en el yacimiento cuaternario alrededor del río Medellín, Girardota, 10 km al norte de Medellín.</i>	49
<i>Figura 10. Extracción artesanal en aluvión del Río Tonusco, cerca de Santa Fe de Antioquia.</i>	49
<i>Figura 11. Explotación artesanal de arenas en el Río Cauca, sector de Bolombolo. Fotografía: el autor</i>	50
<i>Figura 12. Cargue de áridos en equipo móvil, tipo volco de cuatro ejes en cantera de áridos, Antioquia.</i>	50
<i>Figura 13. Equipos de transporte interno de áridos en Canteras de Colombia, propiedad del Grupo Argos.</i>	51
<i>Figura 14. Localización de los puntos de toma de información y muestras de roca en las unidades litoestratigráficas. Fuente: Modificado de Calle et al., 1980; Mejía et al., 1983a; Mejía et al., 1983b</i>	64
<i>Figura 15. Distribución de unidades litoestratigráficas en el área de investigación.</i>	68
<i>Figura 16. Distribución de las fuentes de arena y grava en depósitos no consolidados: Aluviones y terrazas (área naranja), otros depósitos no consolidados (área rosada). Ríos: línea azul; vías: línea naranja.</i>	78
<i>Figura 17. Depósitos de arenas en el Río Cauca, vía Santa Fe de Antioquia – Sopetrán. Fotografía: el autor</i>	79
<i>Figura 19. Extracción de arena y grava en la desembocadura del río Tonusco al río Cauca.</i>	80
<i>Figura 19. Composición litológica de los depósitos no consolidados con arena y grava.</i>	81
<i>Figura 20. Medida del grado de redondez de los cantos (40 y 19,5 mm) en los depósitos no consolidados con arena y grava.</i>	82
<i>Figura 21. Muestra de gravas localizadas “in situ” sobre el aluvión del río Cauca. Forma predominante redondeada a subredondeada y composición litológica enriquecida en basalto y menos de neises y granitos. Aluvión del río Cauca cerca de Santa Fe de Antioquia.</i>	82
<i>Figura 22. Medida de la Forma de los cantos (40 y 19,5 mm; 1 ½” y ¾”) en los depósitos no consolidados con arena y grava.</i>	83
<i>Figura 23. Perfil de un aluvión en la quebrada Aburrá, afluente del río Cauca. Material arena y grava.</i>	83
<i>Figura 24. Localización de los datos del ensayo pasa malla No. 200 en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampostería.</i>	84
<i>Figura 25. Localización de los datos del ensayo peso específico en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampostería</i>	84
<i>Figura 26. Localización de los datos del ensayo absorción en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampostería</i>	85

<i>Figura 27. Localización de los datos del ensayo Terrones de arcilla y partículas deleznales en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampostería</i>	85
<i>Figura 28. Localización de los resultados del ensayo partículas livianas en los depósitos no consolidados con material potencial para mampostería.</i>	86
<i>Figura 29. Distribución del tamaño de grano de la muestra MMS 1956-1</i>	86
<i>Figura 30. Distribución del tamaño de grano de las muestras alrededor del Fuller 2"</i>	87
<i>Figura 31. Distribución del tamaño de grano de las muestras alrededor del Fuller 4".</i>	87
<i>Figura 32. Distribución del tamaño de grano de la muestra MMS 1970 según Fuller 3".</i>	88
<i>Figura 33. Llanura aluvial del río San Juan con abundante material tipo gravas, sector de Bolombolo.</i>	89
<i>Figura 34. Aluvión en el río Chico, sector de Belmira con abundante material tipo grava gruesa.</i>	90
<i>Figura 35. Perfil de una explotación de arena y grava en una terraza aluvial del río Medellín, sector del Valle de Aburrá, ciudad de Medellín.</i>	91
<i>Figura 36. Operación extractiva de arenas y gravas en terrazas del río Medellín, sector Valle de Aburrá, Medellín.</i>	91
<i>Figura 37. Barras laterales de arena en el río Cauca, sector de Santa Fe de Antioquia. Fotografía: el autor.</i>	93
<i>Figura 38. Distribución del tamaño de grano de muestras en depósitos no consolidados con arena.</i>	93
<i>Figura 39. Aluvión del río Cauca, altura de Bolombolo, con abundante arena fina empleada en mampostería.</i>	94
<i>Figura 40. Extracción de arena fina utilizada en mampostería. Aluvión del río Cauca, sector de Bolombolo.</i>	95
<i>Figura 41. Distribución de depósitos potenciales para arenas y gravas en rocas estratificadas (zonas amarillas). Ríos: línea azul; vías: líneas sencilla y doble naranja.</i>	96
<i>Figura 42. Estratos de arenisca cuarzosa y limolitas en la Carretera Sopetrán – Santa Fe de Antioquia.</i>	97
<i>Figura 43. Exposición de la Formación Amagá con estratos de arenisca y limolitas en el sector de Sopetrán.</i>	98
<i>Figura 44. Localización de los resultados del ensayo pasa tamiz No. 200 en depósitos potenciales de arenas y gravas de acuerdo a la norma NTC 174 para áridos gruesos y finos.</i>	99
<i>Figura 45. Localización del peso específico aparente de arenas y gravas de acuerdo a ASTM para áridos gruesos.</i>	99
<i>Figura 46. Localización de los datos de absorción en unidades potenciales para arenas y gravas de acuerdo a la especificación para áridos gruesos.</i>	100
<i>Figura 47. Localización de los datos de desgaste en la máquina de Los Ángeles en unidades potenciales para muestras de gravas las formaciones Combia y Amagá, y su comparación con los depósitos no consolidados.</i>	100
<i>Figura 48. Localización de los datos de terrones de arcilla y partículas deleznales en unidades potenciales para arenas y gravas de acuerdo con las especificaciones de NTC 174 para la elaboración de hormigón.</i>	101
<i>Figura 49. Localización de los datos de terrones de arcilla y partículas deleznales en unidades potenciales para arenas y gravas de acuerdo con las especificaciones de INV E221 utilizadas en carreteras.</i>	101
<i>Figura 50. Distribución granulométrica de la muestra 2007-3 de la Formación Amagá.</i>	102
<i>Figura 51. Distribución de las fuentes de arena y grava en macizos rocosos (zonas marrones). Ríos: línea azul; vías: doble línea discontinua.</i>	103
<i>Figura 52. Cantera de arena en rocas del Stock de Amagá con alta meteorización.</i>	104
<i>Figura 53. Perfil del Stock de Amagá con abundante meteorización que ha creado un perfil rico en arena. Carretera Medellín – Amagá.</i>	104
<i>Figura 54. Distribución del tamaño de grano de acuerdo al rango Fuller de 1" de material arenoso proveniente del Stock de Amagá, muestra MMS 1971 (arriba) y del Gneis de la Miel, muestra 2002 (abajo)</i>	106
<i>Figura 55. Distribución del tamaño de grano de material arenoso proveniente del Batolito Antioqueño (muestra MMS 1999) de acuerdo al rango de control NTC 174 (líneas verdes).</i>	107

Figura 56. Exposición rocosa del Stock de Altavista en cercanías a Medellín. _____	108
Figura 57. Distribución de rocas ígneas, volcánicas (verde oscuro), hipoabisales (verde claro) e intrusivas (gris). Río: línea azul; vía: línea discontinua naranja. _____	110
Figura 58. Expresión morfológica del cuerpo porfídico, Cerro Tusa (geoforma triangular) y rocas estratificadas de la Formación Amagá. _____	111
Figura 59. Exposición de tobas y andesitas porfídicas. Carretera Jericó – La Pintada. _____	112
Figura 60. Muestra de andesita hornbléndica porfídica. _____	113
Figura 61. Andesitas y basaltos de la unidad Basaltos de Barroso. Carretera Santa Fe de Antioquia – Buriticá. _____	114
Figura 62. Muestra de roca de Basaltos de Barroso. _____	115
Figura 63. Expresión morfológica de la Formación Combia en la población de Jardín. _____	116
Figura 64. Iglesia de la localidad de Jardín construida totalmente con tobas de la Formación Combia. _____	116
Figura 65. Excavaciones en trabajos de construcción de carretera en rocas del Complejo Quebradagrande, vía Medellín – Santa Fe de Antioquia. _____	117
Figura 66. Muestra de basalto en el Complejo Quebradagrande. _____	118
Figura 67. Muestras de roca de la Diorita de Heliconia. Carretera Ebéjico – Heliconia. _____	120
Figura 68. Exposición rocosa en el Batolito de Santa Fe (antes Batolito de Sabanalarga). Fotografía: el autor _____	121
Figura 69. Operación extractiva en la Metaharzburgita de Medellín. Vía Medellín – Guarne. _____	122
Figura 70. Distribución de las rocas metamórficas: migmatitas y neises (gris), anfibolitas (magenta). Ríos: línea azul; vías: línea gris. _____	126
Figura 71. Afloramiento del Gneis de Palmitas, carretera Medellín – Sopetrán. _____	127
Figura 72. Muestra de roca del Gneis de Palmitas. _____	129
Figura 73. Valores del peso específico aparente de rocas metamórficas y su comparación con las rocas ígneas con potencialidad para áridos de machaqueo _____	130
Figura 74. Valores de la absorción de materiales potenciales en rocas metamórficas para áridos de machaqueo y su comparación con las rocas ígneas. _____	130
Figura 75. Valores del desgaste en la máquina de Los Ángeles en rocas metamórficas y su comparación con rocas ígneas. _____	131
Figura 76. Muestras de cuarcitas y esquistos cuarzo micáceos del Complejo Cajamarca. _____	132
Figura 77. Afloramiento rocoso de la anfibolita de Medellín. _____	133
Figura 78. Muestras de roca de la Anfibolita de Medellín. _____	134
Figura 79. Exposición rocosa de la Anfibolita de Sucre. Carretera Santa Fe de Antioquia - Sopetrán. _____	135
Figura 80. Corte en la carretera con afloramiento de rocas de las Anfibolitas de Sucre. _____	136
Figura 81. Cantidad de la producción de gravas en Colombia 2016 – 2022. _____	138
Figura 82. Producción gravas área de influencia de la ciudad de Medellín. _____	139
Figura 83. Construcción de edificaciones de vivienda, oficinas y centros deportivos en la ciudad de Medellín. _____	139
Figura 84. Precio unitario en mina de las gravas para áridos en Medellín (Pesos corrientes). _____	140
Figura 85. Precio unitario en mina de las gravas para áridos en Medellín (Dólares americanos corrientes). _____	140
Figura 86. Producción de arenas en Colombia 2016-2022. _____	141
Figura 87. Producción de arenas en el área de influencia de Medellín, 2016 -2022. _____	142
Figura 88. Precios unitarios de la arena en Medellín 2016 – 2022. Pesos corrientes. _____	142
Figura 89. Precios unitarios de la arena en Medellín 2016 – 2022 (USD corrientes _____	143
Figura 90. Área construida en edificaciones en Medellín 2016 -2022 _____	143
Figura 91. Construcción de edificios para vivienda urbana y oficinas en el sector sur del Área Metropolitana, Medellín. _____	144

Figura 92. Área construida (m ²) en vivienda en Medellín.	145
Figura 93. Línea central del Metro de Medellín con planes de expansión	145
Figura 94. Autopista Medellín – Manizales. Programa de interconexión nacional.	146

Lista de Tablas

Tabla 1. Normas técnicas empleadas en esta investigación.	31
Tabla 2. Especificaciones de la NTC 174 para arenas utilizado en la fabricación de hormigón de cemento portland.	32
Tabla 3. Especificaciones para árido grueso (grava) utilizado en la fabricación de hormigón de cemento portland (NTC 174)	32
Tabla 4. Granulometría para los áridos finos empleados en la elaboración de hormigón (NTC 174)	32
Tabla 5. Requisitos de gradación para áridos gruesos empleados en la elaboración de hormigón (NTC 174)	33
Tabla 8. Ensayos a los áridos para su uso en carreteras.	36
Tabla 11. Especificaciones para arena empleada en mampostería (NTC 2240)	38
Tabla 12. Granulometría de los áridos para mampostería según NTC 2240	39
Tabla 13. Listado de normas asociadas al ambiente y minería de materiales de construcción.	39
Tabla 14. Normativa ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá relacionada con el sector de los áridos	41
Tabla 15. Tipos petrológicos de rocas ígneas comunes clasificadas según la composición mineral general (García del Cura et al., 2023)	45
Tabla 16. Tipos comunes de rocas metamórficas y la roca origen (Modificado de García del Cura et al., 2023)	46
Tabla 17. Método de trabajo propuesto para la realización de la cartografía de áridos naturales	52
Tabla 18. Perfil de meteorización de un macizo rocoso	53
Tabla 19. Grado de fracturación de un macizo rocoso (Dunn, 1991)	54
Tabla 20. Grado de resistencia de una roca (Dunn, 1991)	54
Tabla 21. Textura o grado de rugosidad o irregularidad de la superficie de una partícula de árido (Smith & Collis, 1993)	54
Tabla 22. Ensayos físicos y análisis químicos realizados en muestras por tipo de roca. Fondo azul: Prueba realizada.	55
Tabla 23. Constituyentes indeseables en los áridos para hormigón	60
Tabla 24. Reactividad Alcali-Silica de constituyentes de rocas, minerales y áridos para hormigón	61
Tabla 25. Términos utilizados para describir los grados relativos de calidad física y química de los áridos naturales	62
Tabla 26. Lista de muestras tomadas en estratos de arena y grava	65
Tabla 27. Lista de muestras de materiales potenciales para arena	65
Tabla 28. Lista de muestras potenciales para áridos de machaqueo	66
Tabla 29. Resultados de los ensayos físicos de los depósitos no consolidados de arena y grava	79
Tabla 30. Composición litológica de los depósitos no consolidados con arena y grava, de acuerdo al método de los 50 Cantos.	80
Tabla 31. Grado de redondez y forma de los depósitos no consolidados.	81
Tabla 32. Resultados de los ensayos físicos de muestras de arenas en depósitos no consolidados	92

<i>Tabla 33. Resultados de los ensayos físicos de rocas estratificadas con arena y grava.</i>	98
<i>Tabla 34. Resultados del ensayo álcali-sílice en rocas estratificadas de la Formación Combia.</i>	102
<i>Tabla 35. Resultados de los ensayos físicos en macizos rocosos.</i>	105
<i>Tabla 36. Resultados de ensayos físicos realizados a muestras de rocas ígneas para áridos de machaqueo.</i>	111
<i>Tabla 37. Resultados de los análisis de reactividad Álcali – Sílice realizados a muestras de roca ígnea.</i>	112
<i>Tabla 38. Resultados de ensayos físicos realizados a muestras de roca metamórfica para piedra triturada.</i>	127
<i>Tabla 39. Resultados de los ensayos químicos realizados en muestras de rocas metamórficas.</i>	128
<i>Tabla 40. Oferta y demanda de áridos en el plan de mejoramiento de vías en Colombia, período 2023 – 2026.</i>	
<i>Fuente: UPME (2023)</i>	147
<i>Tabla 42. Resumen de calidades de los distintos tipos de rocas estudiados.</i>	157

Abreviaturas y Acrónimos

Sigla	Significado
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
ANEFA	Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos
ANLA	Agencia Nacional de Licencias Ambientales (Gobierno de Colombia)
ANM	Agencia Nacional de Minería
ASTM	American Society for Testing and Materials
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
INVIAS	Instituto Nacional de Vías (Gobierno de Colombia)
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética

1. Introducción

1.1 Motivación

Las arenas y gravas son un elemento básico en la creación de infraestructura, la urbanización, el tratamiento de aguas y la recuperación de tierras. Por esta razón, el consumo y la producción de arena y grava tiene implicaciones para la gestión social y ambiental en proyectos de infraestructura, planificación urbana sostenible, planificación energética y conservación de la biodiversidad (UNEP, 2019). Además, los recursos de arena y grava son el segundo recurso más grande extraído y comercializado por volumen después del agua; sin embargo, es una de las actividades menos reguladas en muchas regiones (UNEP, 2019). Por lo tanto, existe una creciente demanda de información sobre los materiales geológicos y sus características tecnológicas y sobre otros recursos naturales, ya que estos materiales afectan a la ocupación del espacio en las áreas urbanizadas (De Sena y Zuequette, 2021)

La extracción actual de áridos para la industria de la construcción muestra una proyección de la demanda en el mundo que se elevará de 24 a 55 millones de toneladas anuales en el periodo 2011-2060 (OECD, 2018). Esta situación podría acarrear un impacto en los ecosistemas, con daños irreversibles, además de una creciente preocupación por la escasez global de arena y la consecuente aparición de conflictos sociales (Hernández et al., 2023). La obtención de datos espaciales y la cartografía sistemática de los recursos, así como las relaciones con los consumidores, mostrarían cómo cada flujo de suministro está vinculado a resultados ambientales y sociales específicos. Este conocimiento permitiría a investigadores, empresas y gobiernos comprender, organizar y facilitar la cadena de producción y consumo para optimizar los recursos y satisfacer las necesidades estratégicas de desarrollo de las comunidades (Torres et al., 2021). Reconocer la demanda sin precedentes de arenas para la industria de la construcción requiere una cartografía sistemática de estos recursos, tanto a nivel local como regional (UNEP, 2022). La extracción de grandes volúmenes de arena y rocas para la construcción provoca impactos adversos en el medio ambiente y afecta el desarrollo económico y social. Por lo tanto, la gestión conjunta y ponderada de los parámetros geológicos, ambientales y socioeconómicos debe ser una prioridad para la toma de decisiones informadas (UNEP, 2022).

El sector de los áridos es el principal suministrador de materias primas para la construcción de infraestructuras, para la edificación, para la industria y para la protección del medio ambiente, lo que le confiere el carácter de industria estratégica. Los áridos se emplean en obras, como hormigón preparado, prefabricados de hormigón (cerca del 80% del hormigón son áridos), mortero, aglomerados asfálticos (más del 95% son áridos), construcción de carreteras (el 94% de los materiales necesarios para una carretera son áridos), ferrocarriles (balasto), etc. (López-Jimeno y Luaces, 2023)

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), organismo del Estado colombiano, ha venido investigando el mercado de arenas y gravas en varias ciudades de Colombia (UPME, 2014, 2023), entre ellas Medellín y su área de influencia (Figura 1), entidad administrativa llamada Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y que corresponde a la ciudad de Medellín y ocho municipios más.



Figura 1. Panorámica de la ciudad de Medellín.
Fotografía: el autor

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en su estudio "Gestión integral de canteras y explotaciones mineras de materiales para la construcción en el Valle de Aburrá" indicó que, aún en esa época, la mayoría de las explotaciones de materiales

de construcción en Medellín y sus alrededores carecían de planificación y diseño minero ([Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 1999, 2000](#)).

El sector urbano alrededor de Medellín es un área de 1200 km² conformada por nueve entidades administrativas municipales denominada Área Metropolitana del Valle de Aburrá ([Figura 2](#)) y tiene una población de 3.700.000 habitantes ([DANE, 2019](#)). Las actividades extractivas de arenas y gravas en la zona se realizan bajo parámetros de insostenibilidad que dejan graves daños de difícil y costosa reparación, tanto física y económica como socialmente, lo cual se relaciona con pequeñas empresas mineras y artesanales que realizan procesos de baja tecnología ([Ramírez, 2008](#)).

Todas estas consideraciones demográficas, técnicas, económicas y ambientales conducen a la necesidad de conocer el marco potencial de fuentes de áridos naturales con sus características técnicas, localización y disponibilidad, para tener bases con las cuales se pueda proyectar un esquema de desarrollo sostenible para la industria de la construcción. Esto será importante, por una parte, para planear y ejecutar el aprovechamiento adecuado de estos recursos naturales tipo arenas y gravas, tal como las Naciones Unidas lo recomienda, y de otro lado, para disponer de conocimiento y herramientas que ayuden a definir un adecuado uso del suelo, aspecto fundamental en los planes de ordenación territorial.



Figura 2. Área urbana de Medellín con casas y edificios para vivienda.

Fotografía: el autor

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es conocer las fuentes potenciales de áridos en el área de influencia de la ciudad de Medellín, Colombia, para definir su uso en la industria del hormigón. A continuación, se presentan los objetivos específicos de esta investigación.

- Hacer una caracterización tecnológica de las unidades rocosas en los alrededores de Medellín para ser utilizadas como áridos en la industria de la construcción.
- Valorar la calidad y disponibilidad de los materiales en las unidades litológicas de la zona.
- Identificar el marco normativo para el uso de áridos en la zona.
- Definir la demanda actual y proyectada de áridos para la industria de la construcción en Medellín.
- Identificar retos y restricciones y proponer propuestas consolidadas de desarrollo de los áridos en la industria de la construcción para el área de Medellín.

1.3 Localización del área de investigación

El área de investigación se ubica en el noroccidente de Colombia, en sectores de las cordilleras Central y Occidental de los Andes de Suramérica ([Figura 3](#)), particularmente en el sector occidental de Medellín, ciudad capital del departamento de Antioquia. Esta área corresponde a la división cartográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi definida como mapas 130 – Santa Fe de Antioquia, 146 – Medellín Occidental y 166 – Jericó, con una escala 1:100.000. El área comprende las poblaciones de Medellín, Amagá, Andes, Angelópolis, Anzá, Belmira, Bolombolo, Ebéjico, Entrerriós, Fredonia, Heliconia, Jardín, Jericó, La Pintada, Liborina, Palermo, Pueblo Rico, San Pedro, Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, Tarso, Titiribí y Venecia ([Figura 4](#)).

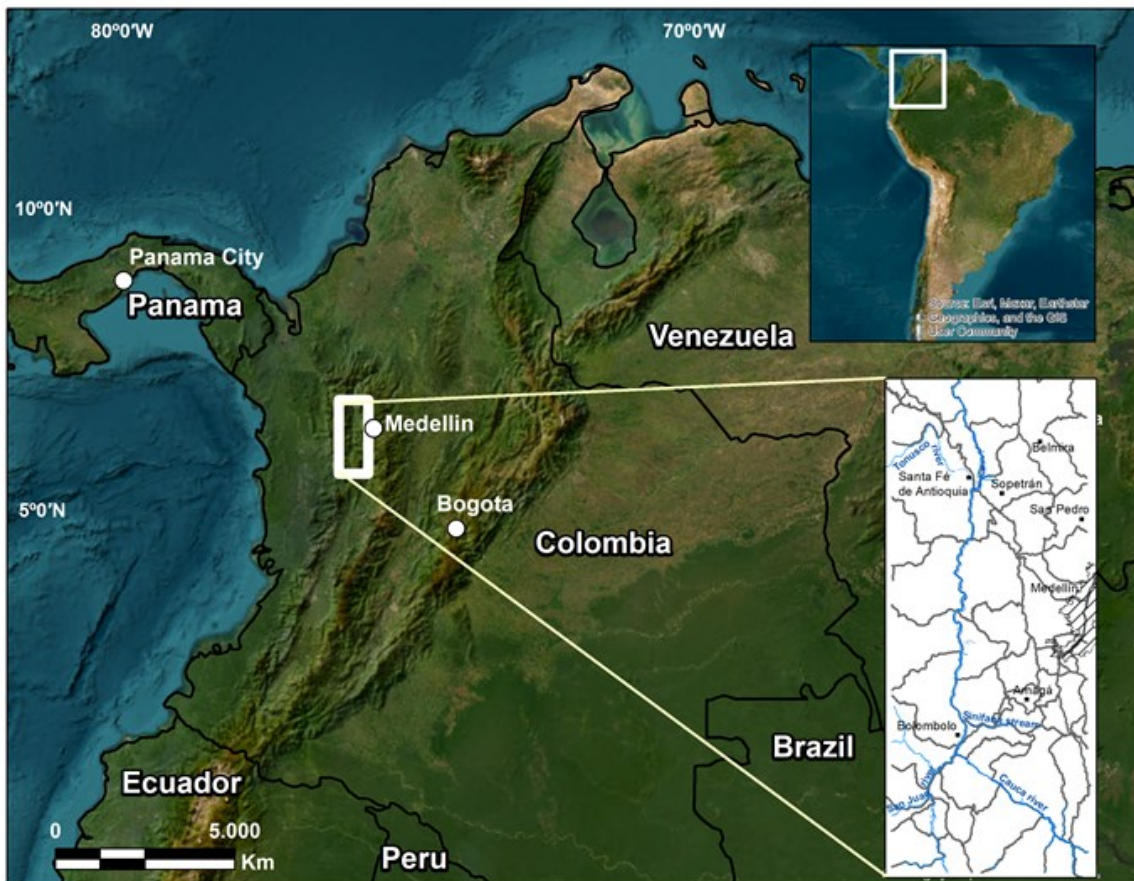


Figura 3. Ubicación del área de estudio al oeste de Medellín (rectángulo blanco).
 Cuadrado blanco: Noroeste de América del Sur. Detalle de las localidades en la Figura 4.
 Fuente: Elaboración propia sobre mapa de Google Earth©.

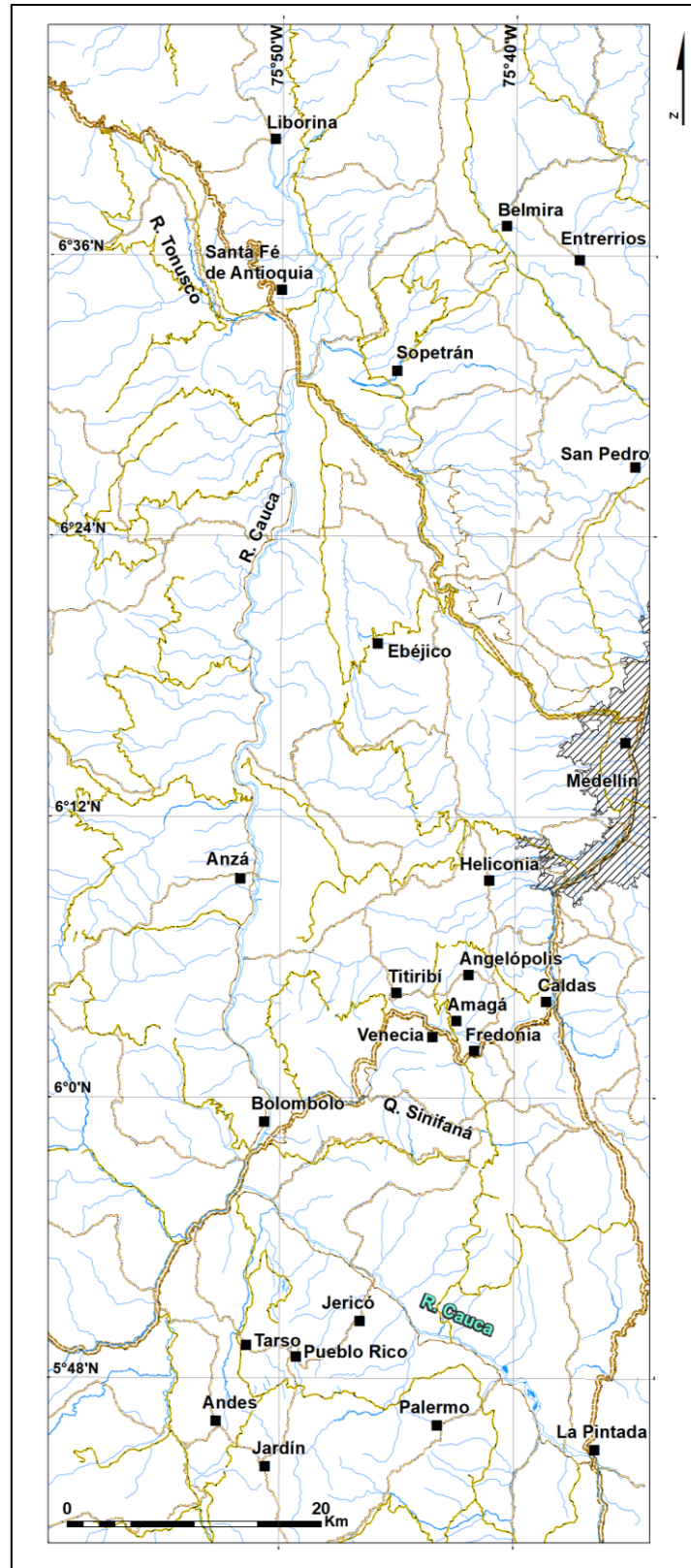


Figura 4. Localización de las poblaciones en el área de investigación. Área rayada: zona urbana de Medellín. Vías: líneas dobles y sencilla de color naranja. Ríos y corrientes de agua: línea azul. Pueblos: cuadrado negro.

Fuente: Elaboración propia.

2. Antecedentes

2.1 Definiciones

Este apartado incluye las definiciones de términos generales empleados en esta tesis, así:

Áridos: Los áridos se definen, normalmente, como fragmentos o granos de materiales minerales, sólidos inertes que, con las granulometrías adecuadas, son apropiados para su uso en construcción (edificación e infraestructuras) y en numerosas aplicaciones industriales, solos o con la adición de cemento, cal o un aglomerante bituminoso (García del Cura et al., 2023). Los principales campos de aplicación de estas materias primas pueden resumirse en:

1. Áridos para la preparación de hormigón.
2. Áridos para la fabricación de aglomerantes asfálticos.
3. Balastos, subbalastos y gravillas.
4. Escolleras para protección de obras portuarias, ríos y canales.
5. Rellenos drenantes y aplicaciones viarias.
6. Materias primas para la industria como cemento, arenas para filtros, cargas, micronizados, etc. (García del Cura et al., 2023).

Los áridos naturales, desde el punto de vista geológico, pueden ser arenas y gravas (sedimentos detríticos actuales y paraactuales o rocas detríticas poco consolidadas) (García del Cura et al., 2023).

Áridos de machaqueo: aquéllos que se obtienen mediante la trituración y molienda de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo superior de los áridos naturales; se incluyen todos los materiales canterables, procedentes de macizos rocosos, cuyas propiedades físicas sean adecuadas (García del Cura et al., 2023)

Árido fino: árido cuyo tamaño de partículas es inferior a 4,8 mm y superior a 75 micras (No 200), NTC 385 (ICONTEC, 2019a)

Árido grueso: árido predominantemente retenido sobre el tamiz de 4,75 mm, según NTC 385 (ICONTEC, 2019a).

Grava: agregado grueso resultante de la desintegración natural y la abrasión de rocas, o del proceso desintegración de conglomerados rocosos débilmente ligados o confinados. (NTC 385; [ICONTEC, 2019a](#))

Grava triturada: producto resultante de la trituración de roca, en la cual todos los fragmentos tienen al menos una cara fracturada. (NTC 385; [ICONTEC, 2019a](#))

Hormigón: material compuesto que consta, esencialmente, de un medio aglutinante dentro del cual están embebidas partículas o fragmentos de áridos; en el hormigón de cemento hidráulico el aglutinante es formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua. (NTC 385; [ICONTEC, 2019a](#)).

2.2 Estudios previos

El tema de los áridos relacionados al área de influencia de la ciudad de Medellín ha sido tratado por varias instituciones académicas y por autoridades locales. Todos los trabajos posteriores al decreto 2372 de 2010 ([Congreso de Colombia, 2010](#)), Ley de Medio Ambiente incluyen los aspectos geológicos, mineros, ambientales y sociales relacionados, también, con el uso de recursos naturales asociados a la industria de la construcción. La importancia que tienen estas materias primas en el desarrollo de la región ha sido motivo de trabajos de investigación y de programas orientados al manejo de estos recursos en varias universidades de Colombia. En este capítulo se presenta una síntesis de la información generada por las instituciones académicas y las entidades gubernamentales relacionada con la exploración y planes de gestión de los áridos naturales en la zona de influencia de la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia.

La Agencia Nacional de Minería, organismo adscrito al Ministerio de Minas y Energía del estado colombiano, ha incluido a los áridos dentro de sus minerales estratégicos, materiales indispensables para el desarrollo industrial y de la infraestructura pública ([ANM, 2023a](#)). La demanda del mercado interno en Colombia para abastecer las obras civiles en los últimos años ha presentado un incremento sostenido en los requerimientos de áridos para la construcción de infraestructura y vivienda. El Boletín Técnico de Estadísticas de Cemento Gris de agosto 2022 ([DANE, 2022](#)), que presenta los resultados de la demanda interna de cemento gris para el período septiembre de 2019 – agosto de 2022, identificó un crecimiento trianual de 5,8%. Este trabajo indicó que, particularmente para el período septiembre de 2020 - agosto de 2021, la producción de cemento fue de 13,59 millones de tone-

ladas, en comparación al período septiembre de 2021 - agosto de 2022, donde alcanzó 14,45 millones de toneladas, representando un incremento del 7% (UPME, 2023)

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), entidad del estado colombiano, presenta en 2023 una revisión general del comportamiento actual de la oferta y demanda de los áridos a nivel nacional, incluida la ciudad de Medellín, abordando el mercado a partir de la oferta de minerales de arenas y gravas reportados desde los títulos mineros en etapa de explotación y desde los registros de minería de subsistencia. Los resultados permiten ver el comportamiento del desarrollo del sector de la construcción y definir las posibles líneas de acción que se deben formular desde la planificación minera nacional, para atender la demanda de los diferentes proyectos constructivos a corto plazo que tiene previsto el Gobierno Nacional en el Plan de Desarrollo 2022-2026 (UPME, 2023). De acuerdo con este trabajo, Medellín tiene el segundo mercado más importante del país, pues entre 2016 y 2022 se construyeron más de 20 millones de m² destinados a edificaciones. Al igual que Bogotá, su dinámica estuvo marcada por la desaceleración económica, la pandemia y una leve recuperación posteriormente y así ha sido el comportamiento tanto de las gravas como de las arenas. Sin embargo, estos dos mercados presentan un efecto de sobre-reacción a lo que ocurre en el mercado de la construcción (UPME, 2023)

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) realizó una investigación sobre el mercado de materiales de construcción en varias ciudades de Colombia, entre ellas Medellín y su área metropolitana (UPME, 2014).

Ramírez (2008) aborda el tema de la sostenibilidad de la minería de materiales de construcción en el Valle de Aburrá y hace importantes planteamientos desde las perspectivas ambiental, económica y social. De esta investigación se obtuvo que los escenarios de agotabilidad para las arenas están entre los años 2013 y 2027, y para los triturados y gravas el escenario de agotabilidad está entre el año 2011 y 2019.

Peña (2001) elabora una Propuesta metodológica para la gestión ambiental de la explotación de ladrilleras y canteras en el área de influencia de la ciudad de Medellín. En este trabajo se hace un análisis y revisión de las condiciones técnicas, jurídicas, sociales y administrativas dadas alrededor de las explotaciones de los áridos naturales dentro de un contexto de la gestión ambiental como elemento fundamental para abordar la problemática (Figura 5).



Figura 5. Extracción de material para áridos en el norte de la ciudad de Medellín.
Fotografía: el autor

[Gil et al. \(2000\)](#) presenta los criterios para la ordenación ambiental de la actividad minera en el área de influencia de la ciudad de Medellín. Esto constituye una evaluación general del estado de la explotación de los áridos en el contexto departamental, proyección del sector y participación real del PIB regional. [Gil et al. \(2000\)](#) analizan los antecedentes históricos de la actividad y describen el marco normativo con incidencia sobre la actividad. Hace énfasis en las zonas del área de influencia de la ciudad de Medellín, donde los niveles y la magnitud de los impactos comprometen la estructura metropolitana y en especial la llanura aluvial del río Medellín que constituye un eje hidrográfico que corre de sur a norte atravesando la ciudad de Medellín.

El convenio [Minercol – Mi Río \(2000\)](#) presenta una propuesta para la gestión integral de áreas mineras en la cuenca de la quebrada Altavista – Ciudad de Medellín. Hace un diagnóstico del componente minero ambiental para proyectar acciones para mejorar las condiciones técnicas, físicas, ambientales y sociales de las canteras y las explotaciones de materiales de arrastre localizadas en el área de influencia de la quebrada Altavista y sus alrededores.

[Tobón \(2000\)](#) incluye una síntesis sobre los ensayos físicos y químicos recomendados para hacer la caracterización de los áridos naturales y hace una introducción de la actividad de la industria de la construcción en Medellín.

[G.I.A. \(1999\)](#) presenta una propuesta para la gestión integral de canteras y explotaciones mineras de materiales para la construcción en Medellín. Este equipo realiza un diagnóstico del estado de las canteras y explotaciones mineras de materiales para la construcción, localizadas en Medellín, para implementar un programa de gestión integral de las mismas con el fin de mitigar los impactos producidos sobre los recursos naturales y lograr la restauración geomorfológica y la mitigación de los impactos producidos por las mismas. Desarrolla un SIG (Sistema de Información Geográfico) en ambiente Arc-View con coberturas como topografía, drenajes, malla urbana, tipos de suelos, formaciones superficiales (cuaternarias), unidades de roca, cuencas, catastro minero, explotaciones mineras legales y explotaciones mineras [ilegales](#).

[Chica \(1998\)](#) presenta la evaluación de las explotaciones de material pétreo en el altiplano del Oriente antioqueño conformado por ocho municipios de la jurisdicción de CORNARE (El Retiro, Guarne, Rionegro, Marinilla, El Santuario, El Carmen, La Ceja y San Vicente). Chica (1998) compila la información geológica y realiza una zonificación geomorfológica, elabora un mapa síntesis de la normativa actual en materia de ocupación del suelo y hace un inventario de explotaciones actuales, en un mapa a escala 1: 100.000.

[Avendaño \(1993\)](#) hace el Inventario físico ambiental y jurídico de las explotaciones mineras en el Municipio de Bello, norte de Medellín. El trabajo describe algunos sitios de explotación y su relación litológica. En relación con los aspectos ambientales, expone que la problemática ambiental está relacionada con la extracción de materiales para la construcción reflejada en la degradación del suelo y los recursos naturales, deficiencia en el sistema hídrico y alteración de regímenes hidrológicos, deforestación, contaminación de aguas, asentamientos espontáneos, erosión en las márgenes de las quebradas, daño en vías por el peso de las volquetas, contaminación atmosférica, enfermedades respiratorias, destrucción de las zonas ecológicas y profundidad de cauces.

[Ramírez \(1989\)](#) describe el impacto ambiental de la industria extractiva de materiales de la construcción en el área urbana de Medellín. En el capítulo relacionado con la descripción geológica y caracterización de explotación de áridos se hace una descripción de las unidades geológicas que afloran en la zona de influencia de Medellín y describe las explotaciones de materiales de construcción activas.

[Londoño y Wolff \(1986\)](#) presentan las características geológicas de las principales canteras explotados para áridos en el área urbana de Medellín. Presentan un mapa

geológico simplificado, escala 1:100.000 del valle de Aburrá y analizan los impactos ambientales de la explotación de los áridos.

[González y Uribe \(1985\)](#) elaboran el inventario de materiales pétreos para la construcción en el Valle de Aburrá. Al igual que los trabajos que lo precedieron ([Botero y Mejía, 1983](#); [Arias, 1984](#)), realizan un registro y un control de la calidad de los materiales utilizados en la industria de la construcción. Se obtiene información sobre el área de explotación y volumen aproximado de material, características del material, sistema de explotación, intensidad de explotación, propietario, tiempo de explotación y precios para el comprador.

El Centro Nacional de Estudios de la Construcción – [CENAC \(1977\)](#) presenta el diagnóstico del estado económico y tecnológico del subsector áridos. El CENAC, con la colaboración de Colciencias (actualmente Ministerio de Ciencia y Tecnología) y algunas industrias del sector, elaboró varios estudios sobre los materiales de construcción. Estos trabajos estaban dirigidos al diagnóstico económico y tecnológico de algunos materiales considerados claves dentro del proceso constructivo. En ese sentido sólo se tenía un conocimiento de los sectores siderúrgico y del cemento.

Todos los estudios anteriores han estado fundamentados en el inventario local de canteras, la problemática ambiental inmersa en esta actividad, diagnósticos tecnológico y económico, junto al asunto vital de la legislación ambiental. Esta tesis presenta una visión inicial sobre la distribución de las fuentes de áridos en una distancia mayor a la manejada por la actividad extractiva y suministradora de áridos para Medellín, así como una propuesta de tipos de áridos de acuerdo con su potencial calidad física y química y la asocia con las unidades litoestratigráficas cartografiadas por el Servicio Geológico Colombiano con base en ensayos físicos y químicos, presentando una propuesta metodológica para realizar prospección de áridos desde un entorno geológico sistematizado. De esta manera, las autoridades locales podrán usar esta información para apoyar los planes de ordenamiento del territorio y las empresas fabricantes de áridos tendrán una información básica para localizar las fuentes de áridos naturales para futuros proyectos de infraestructura y urbanismo.

2.3 Marco normativo para el uso de áridos en Medellín

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – (ICONTEC, 2024a) y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2024) son las instituciones que han desarrollado la normatividad colombiana para los áridos naturales empleados como materias primas para la elaboración de hormigón y pavimentos de cemento y asfalto, basados en la normativa de *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

2.3.1 Normas técnicas empleadas

La [tabla 1](#) muestra el listado de las normas técnicas empleadas en esta investigación para la caracterización preliminar de las fuentes de áridos para el área de influencia de Medellín y sus equivalentes en la Unión Europea y USA.

Tabla 1. Normas técnicas empleadas en esta investigación.

Estándar	NTC	UNE	ASTM
Especificaciones estándar para áridos de hormigón (ASTM, 2023a)	174	12620	C 33
Pruebas de impurezas orgánicas en áridos finos para hormigón (ASTM, 2023b)	127	1744-1	C 40
Práctica estándar para el muestreo de áridos (ASTM, 2019a)	129	932-1	D 075
Gravedad específica y absorción de áridos gruesos (ASTM, 2016a)	176	1097-6	C 127
Análisis de tamices de áridos finos y gruesos (ASTM, 2020a)	77	933-1	C 136
Método de ensayo estándar para terrones de arcilla y partículas friables en áridos (ASTM, 2023c)	589	146403	C 142
Especificación estándar para áridos para mortero de albañilería (ASTM, 2019b)	2240	13139	C 144
Método de ensayo para determinar el potencial de reactividad de los áridos al álcali (ASTM, 2016b)	175	146512	C289-7
Ensayo para determinar la granulometría por tamizado (ASTM, 2020c)	1522	933-1	D 6913
Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación de áridos gruesos de gran tamaño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles (ASTM, 2020d)	98	1097-2	C 535

ASTM: *American Society for Testing and Materials*; NTC: Norma Técnica Colombiana, UNE: Normalización Española,

2.3.2 Especificaciones para los áridos de hormigón

La industria de la construcción de hormigón, morteros y obras civiles en Colombia emplea las especificaciones indicadas en la NTC 174 (ICONTEC, 2018) que rige para los áridos finos y áridos gruesos utilizados en la fabricación de hormigón de cemento Portland (Tablas 2, 3 y 4). Los requerimientos de gradación para áridos gruesos empleados en la elaboración de hormigón también están indicados en la NTC 174 (Tabla 5).

Tabla 2. Especificaciones de la NTC 174 para arenas utilizado en la fabricación de hormigón de cemento portland.

Ensayo	Valor
Granulometría	Ajustarse a cualquiera de las bandas granulométricas propuestas por la norma (Tabla 9)
Módulo de finura	entre 2.3 y 3.1
Finos que pasan la malla #200	< 5 %
Material que pasa cualquier tamiz	< 45 %
Contenido de materia orgánica	Que produzca un color más claro que el normal de referencia (Norma NTC 127).
Terrones de arcilla y partículas deleznable	< 3 %
Reactividad Alkali-Árido	No reactivo

Tabla 3. Especificaciones para árido grueso (grava) utilizado en la fabricación de hormigón de cemento portland (NTC 174)

Ensayo	Valor
Granulometría	Ajustarse a cualquiera de las bandas granulométricas
Finos que pasan la malla #200	< 1 %
Pérdida de peso en solidez en sulfato de sodio	< 12 %
Pérdida por abrasión en la máquina de Los Ángeles	< 50 %
Terrones de arcilla y partículas deleznable	< 5 %

Tabla 4. Granulometría para los áridos finos empleados en la elaboración de hormigón (NTC 174)

Tamiz		Porcentaje que pasa
Tamaño	No.	
9.5	3/8"	100
4.75	No.4	95-100
2.36	No.8	80-100
1.18	No.16	50-85
600 µm	No.30	25-60
300 µm	No.50	10-30
150 µm	No.100	2-10

Tabla 5. Requisitos de gradación para áridos gruesos empleados en la elaboración de hormigón (NTC 174)

No. Del tamaño del árido	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (% en masa)							
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	
1	90-37,5	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	
2	63-37,5	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	
3	50-25	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	
357	50-4,75	-	-	-	100	95-100	-	35-70	
4	37,5-19	-	-	-	-	100	90-100	20-55	
476	37,5-4,75	-	-	-	-	100	95-100	-	
5	25-12,5	-	-	-	-	-	100	90-100	
56	25-9,5	-	-	-	-	-	100	90-100	
57	25-4,75	-	-	-	-	-	100	95-100	
6	19-9,5	-	-	-	-	-	-	100	
67	19-4,75	-	-	-	-	-	-	100	
7	12,5-4,75	-	-	-	-	-	-	-	
8	9,5-2,36	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 5b (Cont.). Requisitos de gradación para áridos gruesos empleados en hormigón (NTC 174)

No. Del tamaño del árido	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada) (mm)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (% en masa)						
		19,0 mm	12,5 mm	9,5	4,75 mm (No. 4)	3,36 mm (No. 8)	1,18 mm (No. 16)	
1	90-37,5	0-5	-	-	-	-	-	
2	63-37,5	0-5	-	-	-	-	-	
3	50-25	-	0-5	-	-	-	-	
357	50-4,75	-	10-30	-	0-5	-	-	
4	37,5-19	0-15	-	0-5	-	-	-	
476	37,5-4,75	35-70	-	10-30	0-5	-	-	
5	25-12,5	20-55	0-10	0-5	-	-	-	
56	25-9,5	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-	
57	25-4,75	-	25-60	-	0-10	0-5	-	
6	19-9,5	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-	
67	19-4,75	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-	
7	12,5-4,75	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-	
8	9,5-2,36	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5	

A continuación, se presenta un compendio de las especificaciones de ICONTEC requeridas para los áridos empleados en la fabricación de hormigón en edificios y obras civiles y las normas de INVIAS empleadas en la construcción de carreteras (Tabla 6)

Tabla 6. Compendio de las especificaciones de ICONTEC e INVIAS requeridas para los áridos naturales empleados en la elaboración de hormigón

ENSAYO	ESPECIFICACIONES	ENSAYO	ESPECIFICACIONES
Pasa 200 (%)	NTC 174 Árido fino: <5 Árido grueso: <1	Terrones de Arcilla y Partículas delezna- bles (%)	NTC 174 Árido fino: < 3 Árido grueso:< 5 INVIAS E-221 Árido fino: < 1 Árido grueso:< 0.25
Peso específico aparente (g/cm ³)	ASTM C127 Árido grueso: >2,55	Partículas livianas (%)	INVIAS E-221 Árido fino: < 0,5 Árido grueso: < 1
Absorción (%)	ASTM Árido grueso: <3	Sulfato (%)	INVIAS E-233 Árido fino y Árido grueso: <1,2
Desgaste en la Máquina de Los Ángeles (%)	NTC 174 Árido grueso: LA< 50 INVIAS E-218 y E-219 Árido grueso, LA< 40	Índice de Aplanamiento y Alargamiento.	INVIAS E-230 <15%
Pérdida por Solidez al Sulfato de Sodio (%)	NTC 174 Árido grueso: <12 INVIAS E-220 Árido grueso: <12 Árido fino: <12	Reacción Álcali-árido	NTC 174; INVIAS E-234 No potencialmente reactivo
Pérdida por Solidez al Sulfato de Magnesio (%)	NTC 174 Árido grueso: <12 INVIAS E-220 Árido grueso: <18 Árido fino: <15		

En el medio colombiano es muy común que ni la arena ni la grava de que se dispone para elaborar el hormigón cumplan con la recomendación granulométrica. Sin embargo, se puede hacer una optimización mezclando la arena y la grava que se tienen en una proporción tal, que se puedan lograr relaciones árido fino – árido grueso convenientes. Para lograr esto, es necesario hacer uso de una especificación que involucre todo el árido del hormigón desde las partículas más finas de la arena hasta las partículas más grandes de la grava (Asocreto, 1998). La gradación más usada es la de Fuller &Thompson cuyas curvas se presentan en la [tabla 7](#).

Tabla 7. Granulometría de Fuller & Thompson para los tamaños máximos mostrados
(Asocreto, 1998)

TAMIZ		D = 50 mm	D = 38 mm	D = 25 mm	D = 19 mm	D = 12,5 mm
Pulgadas	mm	(2")	(1 ½ ")	(1")	(¾ ")	(½")
2	50,8	100				
1 ½	38,1	87	100			
1	25,4	71	82	100		
¾	19,0	61	71	87	100	
½	12,5	50	58	71	82	100
3/8	9,5	43	50	61	71	87
No. 4	4,8	31	35	43	50	62
No. 8	2,4	22	25	31	35	44
No. 16	1,2	15	18	22	25	31
No. 30	0,600	11	12	15	18	22
No. 50	0,300	8	9	11	13	16
No. 100	0,150	5	6	8	9	10

2.3.3 Ensayos sobre los áridos para carreteras

Los áridos de machaqueo y las arenas y gravas, son empleados en la construcción de carreteras pavimentadas. La estructura general de una carretera pavimentada consiste en una serie de capas que parten del lecho rocoso o material firme y que consisten en subbase, base granular y base asfáltica o de hormigón de cemento portland. Además, los áridos naturales son empleados en otras obras civiles como terraplén, gaviones, pedraplén, afirmado, entre otros. El Instituto Nacional de Vías – INVIAS, tiene una normativa que muestra las especificaciones requeridas para los materiales que serán utilizados como áridos naturales en la construcción de las capas de rodadura, incluyendo el pavimento asfáltico y de hormigón. La [tabla 8](#) presenta los ensayos que se deben realizar a los áridos de acuerdo con las normas viales en Colombia.

Tabla 6. Ensayos a los áridos para su uso en carreteras.

Ensayo	Descripción	Norma Referencia
INV E-125-13	Determinación del límite líquido de los suelos.	ASTM D 4318-10
INV E-126-13	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	ASTM D 4318-10
INV E-133-13	Equivalente de Arena de suelos y áridos finos.	ASTM D 2419-09
INV E-148-13.	CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.	ASTM D 1883-07
INV E-211-13	Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los áridos.	ASTM C 142/C 142M-10
INV E-212-13	Presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas para la preparación de morteros o concretos.	ASTM C 40/C40M - 11
INV E-213-13	Granulometría.	ASTM C-136-06
INV E-214-13	Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 micras (No. 200) en los áridos pétreos mediante lavado.	ASTM C 117-04
INV E-218-13	Resistencia a la degradación de los áridos de tamaños menores de 37.5 m (1 ½") por medio de la máquina de Los Ángeles.	ASTM C 131-06
INV E-219-13	Resistencia a la degradación de los áridos de tamaños mayores de 19 mm (¾") por medio de la máquina de Los Ángeles.	ASTM C 535-09
INV E-220-13	Solidez de los áridos frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.	ASTM C 88 – 05
INV E-221-13	Cantidad de partículas livianas en un agregado pétreo.	ASTMC123/C 123M – 12
INV E-222-13	Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino.	ASTM C 128-07a
INV E-224-13	Determinación del valor del 10% de finos.	BS 812 Part 110 – 1990
INV E-227-13	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.	ASTM D 5821-01
INV E-230-13	Índices de aplanamiento y de alargamiento de los áridos para carreteras.	BS 812-105.1: 1989, BS 812-105.2: 1990
INV E-233-13	Determinación del contenido de azufre en los áridos pétreos.	UNE-EN 1744-1 Parte 1: Capítulo 11
INV E-234-13	Determinación de la reactividad potencial álcali sílice de áridos (Método químico).	ASTM C 289-07
INV E-235-13	Valor azul de metileno en áridos finos.	EN 933-9
INV E-238-13	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la gradación por abrasión, utilizando el aparato Micro – Deval.	ASTM D 6928-10
INV E-239-13	Determinación del contenido de vacíos de áridos finos no compactados (Influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría).	ASTM C-1252-06
INV E-240-13	Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en áridos gruesos.	ASTM D 4791-10
INV E-240-13	Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en áridos gruesos.	ASTM D 4791-10

Fuente: [INVIAS \(2013a, 2013b\)](#), [Marín-Jaramillo \(2018\)](#).

2.3.4 Especificaciones de los áridos para carretera

La industria de la construcción de carreteras atiende los ensayos del INVIAS aplicados a los áridos naturales empleados en capas de rodadura (carreteras) (Tabla 9). Las especificaciones de INVIAS requeridas para los áridos naturales empleados en la elaboración de pavimentos de vías puede verse en la Tabla 10.

Tabla 9. Ensayos del INVIAS aplicados a los áridos naturales empleados en capas de rodadura. Código-Ensayo aplicados a la tabla 10.

Código Ensayo	Nombre del Ensayo	Norma INVIAS
1	Índice de plasticidad	E125-13
2	Índice de aplanamiento y alargamiento (%)	E-230
3	Equivalente de arena (%)	E-133
4	Desgaste en la Máquina de Los Ángeles (%)	E-218 E-219
5	Pérdida por Solidez en NaSO ₄ (%)	E-220
6	Pérdida por Solidez en MgSO ₄ (%)	E-220
7	Caras fracturadas (%)	E-227
8	Terrones de arcilla y partículas deleznales (%)	E-211
9	Reactividad Alkali-árido	E-234
10	Partículas livianas (%)	E-221
11	Sulfatos (SO ₄)	E-233
12	Mat. orgánica (colorimetría)	E-221
13	Granulometría	

Fuente: (INVIAS, 2024)

Tabla 10. Especificaciones de INVIAS requeridas para los áridos naturales empleados en la elaboración de pavimentos de vías.

Producto	Normas INVIAS											
	E125-13	E230	E133	E218 E219	E220	E220	E227	E211	E234	E221	E233	E212
Pedraplén				≤50								
Subbase granular	≤ 6		>25	<50	<12	<18						
Base granular	≤ 3	≤ 35	>30	<40	<12	<18	>50					
Afirmado	4-9			<50	<12	<18						
Base asfáltica				<40								
Pavimento asfáltico Árido grueso				<40				0				
Pavimento asfáltico Árido fino				<40				0				
Pavimento rígido Árido grueso				<35				≤0,25				
Base asfáltica-Árido grueso	≤ 7			≤50								
Base asfáltica-Suelos	≤ 7											
Gaviones				≤50								

Tabla 10 (continuación). Especificaciones de INVIAS requeridas para los áridos naturales empleados en la elaboración de pavimentos de vías.

Producto	Normas INVIAS											
	E125-13	E230	E133	E218 E219	E220	E220	E227	E211	E234	E221	E233	E212
Hormigón - Árido fino			> 60					<1	No	<0.5	<1.2	
Hormigón - Árido grueso			≤ 15	≤40	<12	<18		<0.25	No	<1	<1.2	
Hormigón - Árido ciclópeo				≤50								
Pavimento hormigón Árido fino			> 60		<12	<15		<1	No	<0.5	<1.2	≤3
Pavimento hormigón Árido grueso			≤ 15	≤40	<12	<18		<0.25	No	<1	<1.2	

Fuente: (INVIAS, 2024).

2.3.5 Áridos para mampostería

El mortero es una mezcla de arena natural (u otro árido fino) y un cementante de caliza o yeso, utilizado en la mampostería como material pegante o como material de cobertura. La arena es el constituyente mayor y la calidad del mortero depende del tamaño de la partícula y la forma de la arena, así como de las impurezas que contenga la arena. Las especificaciones para mortero indican que las arenas deben ser duras, durables, limpias y deben estar libres de sustancias como arcillas. Las especificaciones de las NTC para los áridos empleados en mampostería y la distribución del tamaño de las partículas se presentan en las [tablas 11 y 12](#).

Tabla 7. Especificaciones para arena empleada en mampostería (NTC 2240)

Ensayo	Valor
Material retenido en dos tamices consecutivos	< 50 %
Material entre tamices No.50 y No.100	< 25 %
Terrones de arcilla y partículas deleznable	< 1 %
Partículas livianas	< 0.5 %
Contenido de materia orgánica	Que produzca un color más claro que el normal de referencia.
Pérdida de peso en solidez en sulfato de sodio	< 10 %
Módulo de finura	No debe diferir en más de 0.2 del valor escogido para el mortero

Fuente: ICONTEC (2020)

Tabla 8. Granulometría de los áridos para mampostería según NTC 2240

Tamiz NTC	Porcentaje que pasa	
	Arena Natural	Arena Triturada
4,75 mm (No. 4)	100	100
2,36 mm (No. 8)	95 a 100	95 a 100
1,18 mm (No. 16)	70 a 100	70 a 100
600 µm (No. 30)	40 a 75	40 a 75
300 µm (No. 50)	10 a 35	20 a 40
150 µm (No. 100)	2 a 15	10 a 25
75 µm (No. 200)		0 a 10

Fuente: (ICONTEC, 2020)

2.3.6 Normativa ambiental

A continuación, se presenta la normativa relacionada con la conservación y gestión de ecosistemas hídricos y las normas e instrumentos referentes al sector de los materiales de construcción dictadas por el Gobierno colombiano (Tabla 13) y aplicadas por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (área de influencia de la ciudad de Medellín). La normativa ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá relacionada con el sector de los áridos se presenta en la tabla 14.

Tabla 9. Listado de normas asociadas al ambiente y minería de materiales de construcción.

NORMA	OBJETO
Ley 165 de 1994	Por medio de la cual se aprueba el "Convenio sobre la Diversidad Biológica", hecho en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992.
Ley 357 de 1997	Por medio de la cual se aprueba la "Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas",
Ley 388 de 1997	Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones. Uno de sus objetos principales es el establecimiento de los mecanismos que permitan al municipio, en ejercicio de su autonomía, promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes.
Resolución 157 de 2004	Por la cual se reglamentan el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, y desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la Convención RAMSAR
Decreto 2372 de 2010	Por el cual se reglamenta el Decreto Ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto Ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones.
Decreto 510 de 2011	Por el cual se adoptan las directrices para la formulación del Plan de Acción para la Atención de la Emergencia y la Mitigación de sus efectos.
Ley 1523 de 2012	Por el cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones.

Tabla 13. Listado de normas asociadas al ambiente y minería de materiales de construcción (Continuación)

NORMA	OBJETO
Decreto 1640 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. (Compilado posteriormente en el Decreto 1076 de 2015)
Decreto 953 de 2013	Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993, modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011 para la conservación de áreas estratégicas para el suministro de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales.
Resolución 1907 de 2013	Por la cual se expide la Guía Técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible
Decreto 298 de 2016	Por el cual se establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático y se dictan otras disposiciones.
Ley 1844 de 2017	Por medio de la cual se aprueba el "Acuerdo de París" Cambio climático
Decreto 2245 de 2017	Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas.
Decreto 0870-2017	Por el cual se establece el pago por Servicios Ambientales y otros incentivos a la conservación
Resolución 0957 de 2018	Por la cual se adopta la Guía Técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia y se dictan otras disposiciones
Ley 1931 de 2018	Por la cual se establecen directrices para la gestión del Cambio Climático.
Resolución 0566 de 2018	Por la cual se adopta la "Guía Metodológica para la Formulación de los Planes de Manejo Ambiental de Microcuencas
Ley 1930 de 2018	Por medio de la cual se dictan disposiciones para la Gestión Integral de los Páramos en Colombia
Resolución 0886 de 2018	Por la cual se adoptan los lineamientos para la zonificación y régimen de usos en las áreas de páramos delimitados y se establecen las directrices para diseñar, capacitar y poner en marcha programas de sustitución y reconversión de las actividades agropecuarias y se toman otras determinaciones.
Ley 2169 de 2021	Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones
Ley 2294 de 2023	Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 "Colombia Potencia Mundial de la Vida"
CONPES 3700 de 2011	Mediante el cual se adopta la estrategia Institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia.
CONPES 3886 de 2017	Lineamientos de política y programa nacional de pago por servicios ambientales para la construcción de paz.
CONPES 3918 de 2018	Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia
CONPES 3919 de 2018	Política nacional de edificaciones sostenibles

Tabla 13. Listado de normas asociadas al ambiente y minería de materiales de construcción (Continuación)

NORMA	OBJETO
Decreto 1640 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. (Compilado posteriormente en el Decreto 1076 de 2015)
CONPES 3915 de 2018	Lineamientos de política y estrategias para el desarrollo regional sostenible del Macizo Colombiano.
CONPES 3934 de 2018	Política de Crecimiento Verde
CONPES 4050 de 2021	Política para la consolidación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas – SINAP
CONPES 4058 de 2021	Política pública para reducir las condiciones de riesgo de desastres y adaptarse a los fenómenos de variabilidad climática
Norma ICONTEC NTC-ISO 14040, 2006	Los planteamientos de manejo del impacto ambiental de la producción de vivienda deben ser eficientes en el uso de materiales.

Fuente: [UPME, 2023](#)

Tabla 10. Normativa ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá relacionada con el sector de los áridos

NORMA	OBJETO
R_amva_0404_2019	Funciones de autoridad ambiental. Por medio de la cual se subroga la Resolución Metropolitana No D 2873 del 28 de diciembre de 2016.
AMVA_1993	Estatuto Metropolitano del Ambiente. Por el cual se adopta el Estatuto Metropolitano del Ambiente
Decreto 1998 DE 2023	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la reglamentación de los Pagos por Servicios Ambientales
Decreto 2041 de 2014	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales
Decreto 1076 de 2015	Reglamentación de calidad y el control a la contaminación del aire,
Ley 99 de 1993	Ley que reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos renovables
Cuerdo Metropolitano No. 24 DE 2019	Por el cual se adopta el Plan de acción para la prevención y control de la contaminación por ruido del Valle de Aburrá y se toman otras determinaciones.
Resolución Metropolitana No. 2390 DE 2020	Por la cual se conforma el Comité Regional de Gestión Integral de Ruido
Acuerdo Metropolitano 5 DE 2014	Por medio del cual se declara como Hecho Metropolitano la Construcción Sostenible y se establecen lineamientos básicos para formular una Política Pública de Construcción Sostenible para el Valle de Aburrá

Fuente: [Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023](#).

2.4 Tipos de yacimientos de áridos naturales

Los áridos naturales son materiales compuestos de fragmentos de roca (arenas y gravas y piedra de machaqueo) que pueden ser utilizados en su estado natural o después de procesos mecánicos tales como trituración, lavado y clasificación según el tamaño. Los yacimientos de áridos naturales corresponden a los grupos denominados arenas y gravas y rocas fuentes para áridos de machaqueo, los cuales se forman por una variedad de procesos geológicos. Volcanes, glaciares, ríos y corrientes y procesos marinos han contribuido a la formación de los materiales que se usan como áridos. Consecuentemente, la clave para localizar los yacimientos disponibles y valorar la potencialidad para nuevas fuentes de áridos es la comprensión de los procesos geológicos que los formaron y los ambientes geológicos en que ellos se presentan. En este capítulo se presentan los yacimientos, según el tipo genético, que fueron reconocidos en este trabajo.

2.4.1 Arenas y Gravas

Existen dos tipos de yacimientos generadores de materiales tipo arenas y gravas en el área de la tesis: los de origen sedimentario y los generados por meteorización.

2.4.1.1 Depósitos sedimentarios

Los yacimientos de arenas y gravas son acumulaciones de fragmentos de roca y partículas de minerales. Estos depósitos resultan de la desintegración de las rocas de basamento y el subsiguiente transporte, abrasión y sedimentación de los materiales meteorizados. El agua es uno de los principales agentes que afectan la distribución de los yacimientos de arenas y gravas. Consecuentemente, la mayor parte de estos materiales se encuentran en depósitos fluviales cerca de ríos y demás corrientes de agua ([Langer, 2016](#)).

Los siguientes tipos de depósitos no consolidados o poco consolidados presentan gran posibilidad de ser utilizados como áridos ([García del Cura et al., 2023](#)):

Eluviales: Materiales alterados in situ, que pueden llegar a constituir suelos en el sentido edafológico de la palabra. Cuando están desarrollados sobre materiales graníticos y bajo clima no muy activo, pueden dar lugar a depósitos de arenas gruesas. En general, muestran una presencia muy alta de finos.

Coluviales: Depósitos, fundamentalmente gravitacionales, que recubren las laderas. Son materiales utilizables como préstamo, o incluso como materia prima para la obtención de áridos de machaqueo. Suelen ser oligomícticos (pocos tipos de rocas)

y si el material original presenta buenas cualidades mecánicas y físico-químicas, puede utilizarse. Los volúmenes en algunos casos pueden llegar a ser importantes.

Depósitos de ríos trezados: un sistema fluvial tipo trezado presenta unas características típicas de un curso continuo de agua con pendientes moderadas, con un lecho de inundación que es recorrido alternativamente por un complejo sistema de canales fluviales, dando lugar a amplios yacimientos de arenas y gravas con escasa presencia de finos. Normalmente la madurez litológica de los elementos es elevada, estando sólo presentes las litologías más estables, por supuesto, en función de la naturaleza del área de origen. Los elementos suelen presentar índices de redondez altos. El volumen de estos depósitos suele ser elevado.

Depósitos de ríos meandriformes: Este tipo de sistemas fluviales, meandriformes o anastomosados pueden representar una evolución del sistema fluvial anterior, en el que predominan las formas sinuosas, en planta, del cauce, como amplias y limosas llanuras de inundación. Puntualmente se desarrollan barras arenosas que constituyen buenos yacimientos para árido tipo arena.

Brechas de falla: materiales no cohesivos generados en zonas de fractura que contienen fragmentos de roca.

2.4.1.2 Depósitos de meteorización

Son el resultado de la descomposición mecánica y química de rocas *in situ* manifestándose principalmente en el perfil de meteorización en los niveles de moderada, alta y extremada meteorización. Las rocas, generalmente graníticas, forman acumulaciones importantes por su dimensión de material arenoso. El agente de meteorización con mayor participación en la formación de estos depósitos es el agua, la cual descompone los minerales feldespáticos generando arcillas y dejando libres los cristales de cuarzo y las micas.

2.4.2 Árido de machaqueo

El árido de machaqueo o trituración es el material rocoso que ha sido sometido a un proceso industrial de disminución de tamaño con la finalidad de obtener un producto de tamaño arena y grava para ser utilizado como árido cumpliendo las especificaciones de la normativa indicada.

Además del tamaño y de la forma de las partículas, el árido de machaqueo se clasifica de acuerdo con el tipo de roca de la cual es producida. Las rocas son ampliamente clasificadas sobre la base de su origen en tres grandes grupos: sedimentarias, ígneas y metamórficas. Debe anotarse que, en un informe de producción de áridos, la industria de los áridos no se adhiere estrictamente a la clasificación petrográfica común para describir las rocas fuentes para árido de machaqueo. Por ejemplo, una “caliza” puede referirse a una caliza, una dolomía o a un mármol no pulido. Similarmente, la roca intrusiva, máfica, de grano grueso y color oscuro, llamada gabro, puede ser identificada como “granito negro” por la industria del árido, incluyendo también en este término las rocas extrusivas de color oscuro tales como el basalto y la andesita. A continuación, se hace una síntesis de las fuentes de árido de machaqueo desde el punto de vista petrográfico.

2.4.2.1 Rocas Sedimentarias

Las rocas generadas en la superficie terrestre, como consecuencia del ciclo de erosión-sedimentación, se clasifican en función de su composición mineralógica y sus texturas, las cuales son, básicamente, de tres tipos: biológicas, clásticas y cristalinas, y se describen a continuación ([García del Cura et al., 2023](#)).

- Areniscas: son rocas generadas por la sedimentación de materiales terrígenos en medios acuosos, cuya composición mineralógica responde a la naturaleza del área de origen del sedimento, cuyas texturas (tamaño, forma) y estructuras (aspecto de conjunto, empaquetamiento, etc.) dependen de la dinámica del medio de sedimentación. Normalmente están cementadas por procesos postsedimentarios, procesos que les puede conferir buenas características mecánicas.
- Carbonatos, en los depósitos marinos de mares epicontinentales, así como de lagos de agua dulce y cauces fluviales y otras corrientes de agua, mostrando texturas biogénicas, esqueletos de organismos y restos de actividad fisiológica de organismos fijadores de CO₂. Estos depósitos materiales pueden transformarse diagenéticamente en rocas calizas, y, en determinadas condiciones ambientales, en dolomías.
- Calizas y dolomías que se encuentran en grandes macizos rocosos que constituyen materiales susceptibles de usarse como áridos ([García del Cura et al., 2023](#)).

2.4.2.2 Rocas ígneas

Generadas a partir de magmas, se clasifican en función de su ambiente de constitución: superficie terrestre o zonas próximas, rocas volcánicas, y zonas profundas de la corteza, rocas plutónicas. Esta situación relativa de su ámbito de constitución influye en la velocidad de cristalización y, por tanto, en el tamaño de los cristales que se distinguen a simple vista, mientras que las rocas volcánicas contienen vidrio y/o cristales de tamaño no distinguible a simple vista (García del Cura et al. 2023). La [tabla 15](#) resume los principales tipos de rocas ígneas que se presentan como fuentes de áridos en el área de la tesis.

Tabla 11. Tipos petrológicos de rocas ígneas comunes clasificadas según la composición mineral general

Extrusivas o volcánicas	Hipoabisales	Plutónicas
Basaltos	Ofitas	Granitos
Fonolitas	Pórfidos	Gabros
Andesitas		

Fuente: (García del Cura et al., 2023)

2.4.2.3 Rocas metamórficas

Excepto para las rocas formadas por actividad, predominantemente, térmica (tipo skarn), la mayor parte de las rocas con metamorfismo regional presentan una estructura de foliación planar causada por la cristalización de minerales filosilicatos, tipo micas. Esta foliación produce planos de debilidad no deseados en un árido, sin embargo, sólo los esquistos, rocas altamente foliadas, son poco o nada utilizadas como áridos. Las anfibolitas bandeadas presentan estructuras planares con lo cual podrían tener poca resistencia al desgaste. Los mármoles, con estructura isótropa, son empleados como piedra triturada, así como las cuarcitas (rocas sedimentarias con cuarzo recristalizado). Por otro lado, los productores tratan a las rocas gnéissicas como rocas ígneas de grano grueso. En la [Tabla 16](#) se indican las principales rocas metamórficas empleadas como áridos.

Tabla 12. Tipos comunes de rocas metamórficas y la roca origen

Roca	Características
Mármoles, materiales de metamorfismo de rocas sedimentarias, tipo caliza o dolomía	Tienen muy buenas propiedades mecánicas y pueden presentar colores y aspectos muy diferentes
Gneises	Rocas con esquistosidad definida por filosilicatos (moscovita, biotita, clorita, etc.) y presencia de minerales análogos al granito, junto con otros típicos del metamorfismo, como el granate.
Anfibolitas	Rocas que se generan por el metamorfismo de rocas volcánicas básicas
Pizarras-esquistos y cuarcitas	Rocas originadas por metamorfismo regional, debido a gradientes de presión y temperatura de materiales sedimentarios ricos en sílice.
Corneanas	Originadas por metamorfismo de contacto debido a la intrusión de magmas fundidos en niveles a bajas profundidades. Según el tipo de material original pueden presentar cordierita o andalucita.

Fuente: [García del Cura et al. \(2023\)](#)

2.5 Estado de la tecnología en la explotación de los áridos en Medellín

En este apartado se presenta un esquema general de los tipos de explotaciones de áridos en los alrededores de Medellín, Colombia, y el tipo de transporte empleado para movilizar los áridos. No corresponde a una presentación exhaustiva pues no está en los objetivos de la tesis, y se expone para dar una idea preliminar al respecto. Se recomienda la lectura del trabajo realizado por la [Universidad Nacional de Colombia – Área Metropolitana del Valle de Aburrá \(2017\)](#).

2.5.1 Tipos de explotaciones y maquinaria.

La industria de los áridos en el área de influencia de Medellín presenta tres tipos de explotaciones:

- Grandes empresas de grupos empresariales que tienen la titularidad minera e instalaciones de canteras de piedra de machaqueo o en aluviones de ríos activos

con plantas de beneficio. Algunas de estas corporaciones benefician los áridos para uso propio en la elaboración de hormigón o para unirlo a su cadena de producción con el cemento, áridos y construcción de hormigón, o para suministrar los áridos a otras compañías. Este es el caso de ARGOS, que es la empresa de cementos más grande en Colombia. Esta empresa tiene varias operaciones mineras de áridos en Medellín (Figuras 6, 7). La planta Canteras de Colombia es la más grande en el área de Medellín y tiene una capacidad instalada de 725.760 toneladas anuales (Argos, 2024)



Figura 6. Arriba: Planta de Canteras de Colombia, autopista Medellín – Rionegro. Abajo: Transporte interno del agregado.

Fuente: [Argos \(2024a\)](#)



Figura 7. Planta de áridos y cemento del Grupo Argos.

Fuente: [Argos \(2024b\)](#)

Un segundo grupo de fabricantes de áridos corresponde a las empresas dedicadas a la extracción y suministro de áridos para los proyectos de construcción de infraestructura y edificación urbanística en el área metropolitana de Medellín. Algunas de ellas están localizadas en los alrededores del río Medellín y en el río Cauca ([Figuras 8, 9](#)).



Figura 8. Planta de Triturados Peñalisa, Salgar, Antioquia, distancia a Medellín: 75 km.

Fuente: [Triturados Peñalisa \(2024\)](#)



Figura 9. Cantera de áridos en el yacimiento cuaternario alrededor del río Medellín, Girardota, 10 km al norte de Medellín.

Fuente: [Mincivil \(2024\)](#)

Un tercer grupo de explotadores y suministradores de áridos corresponde a la minería artesanal que ocupa a personas y equipos de mínimo nivel técnico y con una producción de subsistencia. El desarrollo de esta extracción se da principalmente en los lechos de los ríos ([Figuras 10, 11](#)).



Figura 10. Extracción artesanal en aluvión del Río Tonusco, cerca de Santa Fe de Antioquia.

Fotografía: el autor.



Figura 11. Explotación artesanal de arenas en el Río Cauca, sector de Bolombolo.
Fotografía: el autor

2.5.2 . Transporte de áridos en Medellín

La Universidad Nacional de Colombia elaboró un estudio de transporte de carga para el área de influencia de Medellín, llamada Área Metropolitana del Valle de Aburrá ([Universidad Nacional de Colombia – Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017](#)). Los resultados más importantes de esta matriz indican que se movilizan 90.742 toneladas de materiales de construcción y residuos de construcción al día y lo hacen en 17.023 viajes diarios de carga, en su mayoría las de tipo volcó ([Figuras 12, 13](#)), y transportan en promedio 5,33 toneladas por viaje.



Figura 12. Carga de áridos en equipo móvil, tipo volcó de cuatro ejes en cantera de áridos, Antioquia.

Fuente: [Universidad Nacional de Colombia – Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017](#).



Figura 13. Equipos de transporte interno de áridos en Canteras de Colombia, propiedad del Grupo Argos.
Fotografía: el autor

3. Métodos y Materiales

3.1 Metodología

Esta investigación se realizó según las fases y actividades indicadas en la [Tabla 17](#) con las cuales se buscó cumplir con los objetivos propuestos.

Tabla 13. Método de trabajo propuesto para la realización de la cartografía de áridos naturales

1. Compilación de Información

Inventario de información local

Análisis e interpretación

Elaboración de informe

2. Levantamiento de Información en el Campo

Reconocimiento Geológico. Toma de datos y muestreo de las unidades de roca cartografiadas a escala 1:100000.

Elaboración de Informe de campo

3. Ensayos de laboratorio

Ensayos físicos y químicos

4. Procesamiento de información

Interpretación de resultados de laboratorio

Elaboración de mapas temáticos

Elaboración de informe

5. Estructuración informática del producto

Almacenamiento de datos

Edición de informe

Elaboración de bases de datos

Digitalización de mapas en GIS

3.1.1 Compilación de información

Revisión y síntesis de los trabajos hechos en la región por las instituciones estatales, universidades, corporaciones regionales y las entidades privadas que agremian a las empresas privadas del sector de los áridos, además de las empresas privadas que tienen información disponible. En este paso se establece el estado de la información sobre los áridos en la región, aspectos demográficos en el área de influencia de la ciudad de Medellín, síntesis de la oferta y demanda en el período 2016 – 2022 y su proyección de demanda, y la normativa asociada a la industria de los áridos.

3.1.2 Levantamiento de información en el campo y muestreo de rocas

La base geológica para esta investigación ha sido tomada de los mapas geológicos números 130 – Santa Fe de Antioquia (Mejía et al., 1983a), 146 – Medellín occidental (Mejía et al., 1983b) y 166 – Jericó (Calle et al., 1980), publicados a escala 1: 100 000 por el Servicio Geológico Colombiano.

La toma de información de campo se realizó en dos etapas, así:

1. Visita a las minas, canteras y graveras más importantes, en términos de producción, que corresponden a diferentes tipos de roca, con el objeto de observar directamente las características geológicas de las explotaciones;
2. Realización de cortes geológicos para tomar datos en campo y muestras de material en las unidades litoestratigráficas de roca de cada mapa geológico. Se tomaron 43 muestras de rocas, de 50 kg cada muestra, en las unidades litoestratigráficas del área de estudio.

La descripción de las rocas en el campo se realizó de acuerdo a los conceptos de perfil de meteorización de un macizo rocoso según Deere y Patton (1971) (Tabla 18), grado de fracturación de un macizo según Dunn (1991) (Tabla 19), grado de resistencia de una roca según Dunn (1991) (Tabla 20), y la textura o grado de rugosidad o irregularidad de la superficie de una partícula agregada según Smith and Collins (1993) (Tabla 21). El color de la roca está dado de acuerdo a la carta de colores de Geological Society of America (1984).

Tabla 14. Perfil de meteorización de un macizo rocoso

Nivel	Descripción
A	Zona de eluviación. La infiltración de agua transporta hacia abajo los materiales en suspensión. Zona generalmente rica en materia orgánica.
B	Zona donde se depositan los materiales sólidos provenientes del horizonte A. Los minerales son por lo general de tamaño arcilla.
VI – Suelo Residual	Todo el material rocoso se convierte en suelo. La estructura y la textura no están presentes. Hay gran cambio en el volumen. Sólo una parte de suelo ha sido transportado.
V – Extremada meteorización	Todo el material rocoso está descompuesto o desintegrado a suelo. La estructura original del macizo en gran parte todavía está intacta.
IV – Alta meteorización	Menos de la mitad del material rocoso está descompuesto o desintegrado a suelo. Fresca o decolorada la roca presenta discontinuidad tanto en la estructura como en el núcleo.
III – Moderada meteorización	Menos de la mitad del material rocoso está descompuesto o desintegrado a suelo. La roca, fresca o decolorada, presenta tanto continuidad en la estructura como en el núcleo.
II – Escasa meteorización	La decoloración indica meteorización del material rocoso y discontinuidad en la superficie. Todo el material rocoso puede estar decolorado por meteorización.
I – Roca Fresca	La roca no presenta signos visibles de meteorización, tal vez escasa decoloración sobre superficies discontinuas mayores.

Niveles A y B según Deere & Patton (1971). Niveles I a VI según British Standard (1981), Deerman (1991).

Tabla 15. Grado de fracturación de un macizo rocoso

Grado	Espaciamiento entre fracturas
Macizo	Mayor que 91,44 cm (3 pies)
Moderadamente fracturado	Entre 20,32 cm (8 pulgadas) y 91,44 cm (3 pies)
Muy fracturado	Entre 10,16 cm (4 pulgadas) y 20,32 cm (8 pulgadas)
Extremadamente fracturado	Entre 5,08 cm (2 pulgadas) y 10,16 cm (4 pulgadas)
Triturado	Menor que 5,08 cm (2 pulgadas)

Fuente: [Dunn \(1991\)](#)

Tabla 16. Grado de resistencia de una roca

Grado	Característica
Fuerte	Sonido metálico, quiebra con dificultad al ser golpeado con el martillo
Moderadamente fuerte	Sonido seco. Quiebra con un golpe moderado de martillo
Débil	Corta fácilmente con un cuchillo
Muy débil	Quiebra con la presión de los dedos

Fuente: [Dunn \(1991\)](#)

Tabla 17. Textura o grado de rugosidad o irregularidad de la superficie de una partícula de árido

Textura	Característica
Vítrea	Fractura concoidea
Suave	Gastado por el agua o suave que proviene de fractura laminada o roca de grano muy fino
Rugosa	Las superficies de fractura muestran granos de roca finos a medios.
Granular	Las superficies de fractura muestran granos redondeados de tamaño aproximadamente uniforme
Cristalina	Contiene constituyentes cristalinos fácilmente visibles
Panal	Poros y cavidades visibles

Fuente: [Smith and Collins \(1993\)](#)

3.1.3 Ensayos de laboratorio

La evaluación preliminar de la calidad física de las muestras recolectadas en campo se realizó empleando ensayos de granulometría con tamices ASTM, valor de Paso de Tamiz # 200, peso aparente, absorción, ensayo de Los Ángeles para áridos gruesos de gran tamaño y grumos de arcilla y partícula friable (Tabla 22). Se realizaron pruebas para materiales ligeros, como carbón, lignito, sílex o esquisto. Sin embargo, es necesario decir que las normas relacionadas con esta prueba (ASTM—C123) han sido retiradas en EE.UU. y España, respectivamente. Se realizó una caracterización litológica por el método de 50 granos ([Langer and Lindsay, 1999](#)).

La redondez se ha estimado mediante comparación visual con los estándares (Pet-tijohn, 1975). La forma se ha determinado mediante la medición de las dimensiones largo (A), intermedio (B) y corto (C), con $A > B > C$ (Krumbein, 1941).

La evaluación de la calidad química de los materiales se realizó utilizando las pruebas de reactividad álcali-sílice y presencia de impurezas orgánicas. Las normas empleadas para estos ensayos pueden verse en la tabla 22 y se presenta una síntesis en los siguientes párrafos.

Tabla 18. Ensayos físicos y análisis químicos realizados en muestras por tipo de roca. Fondo azul: Prueba realizada.

Tipo de roca	Muestras (#)	Granulom.	Pasante tamiz 200 (%)	Peso específico	Absorción	Máquina de Los Ángeles	Grupos de arcilla	Reactividad sílice-álcali	Partículas livianas	Sulfatos
Dep. no consolidado.	7									
Ígnea intrusiva	11									
Metamórfica	9									
Hipoabisal	2									
Sedimentaria	2									
Ultramáfica	4									
Volcánica	8									
NTC		1522	78	176	176	98	589	175	130	126
ASTM		D 422	C 136	C 127	C 127	C-535	C 142	C 227	C 123	C 88
UNE		933-1	933-1	1097-6	1097-6	1097-2	146403	146512		1367-2

3.1.3.1 Ensayo para determinar la granulometría por tamizado. NTC-1522

Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la clasificación de los materiales propuestos para su uso como áridos. Los resultados se utilizan para determinar la conformidad de la distribución del tamaño de partícula con los requisitos de especificación aplicables y para proporcionar los datos necesarios para el control de la producción de diversos productos de áridos y mezclas que contienen áridos. Los datos también pueden ser útiles para desarrollar relaciones relacionadas con la porosidad y el empaquetamiento (ICONTEC, 1979)

Este método de ensayo abarca la determinación de la distribución granulométrica de los áridos finos y gruesos mediante tamizado. Algunas especificaciones para los áridos que hacen referencia a este método de ensayo contienen requisitos de clasificación que incluyen tanto las fracciones gruesas como las finas. Se incluyen instrucciones para el análisis de tamiz de dichos áridos (ICONTEC, 1979).

3.1.3.2 Método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μm (# 200) en áridos naturales – NTC 78.

Esta norma establece el método de ensayo para determinar por lavado la cantidad de material más fino que el tamiz 75 μm (No 200) en áridos. Las partículas de arcilla y otras partículas del agregado que se dispersan por el lavado con agua, así como los materiales solubles en el agua, se separan del agregado durante el ensayo. Se incluyen dos procedimientos, uno que utiliza sólo agua para la operación del lavado, y otro que incluye un agente dispersante para que ayude al desprendimiento del material más fino que el tamiz de 75 μm (No. 200) del material grueso. A menos que se especifique de otra manera, se suele usar el procedimiento solo con agua. Los valores establecidos en unidades SI se consideran normativos ([ICONTEC, 2019b](#))

El material más fino que el tamiz de 75 micras (No. 200) puede separarse de las partículas mayores, de manera más eficiente y completa por un tamizado húmedo que por medio de un tamizado en seco. Por lo tanto, cuando se requieren determinaciones precisas del material más fino que 75 micras en áridos finos o gruesos, se debe usar este método de ensayo en la muestra antes que el tamizado en seco. Los resultados de este método de ensayo se incluyen en los cálculos y la cantidad total de material más fino que 75 micras por lavado, más el obtenido por el tamizado en seco de la misma muestra, se informa con los resultados ([ICONTEC, 2019b](#))

3.1.3.3 Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. NTC 176.

Este método de ensayo tiene por objeto determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. La densidad relativa (gravedad específica) es una cantidad adimensional y se puede expresar como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS), o como densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). La densidad relativa SH se determina después de secar el agregado. La densidad relativa SSS y la absorción se determinan después de sumergir el agregado en agua durante un tiempo prescrito ([ICONTEC, 2019c](#))

Una muestra de agregado se sumerge en agua durante 24 horas aproximadamente para saturar los poros. Luego se remueve el agua y se seca la superficie de las

partículas, y se determina su masa. Posteriormente, la masa de la muestra es determinada y sumergida en el agua. Finalmente, la muestra es seca al horno y se determina su masa una tercera vez. Se usan las masas obtenidas y con las fórmulas de este método de ensayo, se calculan tres tipos de densidad y la absorción (ICONTEC, 2019c).

3.1.3.4 Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de áridos gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles. NTC-98

Este método de ensayo abarca el procedimiento para ensayar los áridos gruesos con tamaño máximo menor de 37,5 mm para determinar la resistencia al desgaste, utilizando la máquina de Los Ángeles (véase la Nota 1). NOTA 1 En la NTC 93 se describe un procedimiento para ensayar áridos gruesos de más de 19,0 mm. Por lo tanto, los áridos gruesos con un tamaño máximo entre 19 mm y 37,5 mm, se pueden ensayar mediante esta norma o la NTC 93. Los valores se deben registrar de acuerdo con el Sistema Internacional de unidades (ICONTEC, 2019d).

El ensayo en la máquina de Los Ángeles es una medida del desgaste de los áridos minerales de gradación normalizada resultante de la combinación de acciones que incluyen la abrasión o desgaste, impacto y trituración en un tambor rotatorio de acero que contiene un número especificado de esferas de acero; el número de esferas depende de la gradación de la muestra de ensayo. Cuando el tambor rota, una pestaña recoge la muestra y las esferas de acero, arrastrándolas consigo hasta que ellas caen al lado opuesto del tambor, creando un efecto de impacto-trituración. El contenido, entonces, es arrastrado dentro del tambor con una acción abrasiva y trituradora hasta que golpea de nuevo la pestaña y el ciclo se repite. Después del número prescrito de vueltas, el contenido removido del tambor y la porción de agregado es tamizada para medir el desgaste como pérdida en porcentaje (ICONTEC, 2019d).

3.1.3.5 Método de ensayo estándar para terrones de arcilla y partículas friables en áridos. NTC-589.

Esta Norma establece un método de ensayo para la determinación aproximada de terrones de arcilla y partículas deleznable en los áridos. se determina la masa de la muestra de ensayo con la exactitud especificada en el numeral y se esparce en

una capa delgada sobre el fondo del recipiente, se cubre con agua destilada y se deja humedecer por un periodo de 24 horas. Se giran y aprietan las partículas individualmente entre el dedo pulgar y el índice para intentar romperlas en tamaños más pequeños. No se deben usar las uñas para romper las partículas, ni se deben presionar estas contra una superficie dura o unas contra otras (NTC, 2000a)

Se debe clasificar como terrón de arcilla o partícula deleznable cualquier partícula que se pueda romper con los dedos y obtener así finos removibles mediante tamizado húmedo. Después de romper todos los terrones de arcilla y partículas deleznales perceptibles, se separan los residuos de lo que queda de la muestra, mediante tamizado húmedo, usando el tamiz indicado. Para áridos gruesos, el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales debe ser un promedio basado en el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales en cada fracción de tamaños de tamices como ponderado de acuerdo con la gradación de la muestra original antes de la separación, o preferiblemente, la gradación promedio de la producción representada por la muestra (ICONTEC, 2000a).

3.1.3.6 Método químico para determinar la reactividad potencial álcali – sílice de los áridos. NTC-175

Este método de ensayo busca determinar químicamente la reactividad potencial de un agregado con el álcali del cemento fabricado a base de cemento Portland, indicado por la cantidad de reacción durante 24 horas a 80 grados centígrados entre una solución 1 N de hidróxido de sodio y el agregado que ha sido triturado y tamizado para que pase a través de un tamiz de 300 micras pero que sea retenido por un tamiz de 150 micras (NTC-175 equivalente a ASTM C (ASTM, 2016b)

Este método de ensayo debe ser usado en combinación con otros métodos para evaluar la reactividad potencial de áridos silíceos con los álcalis en hormigones producidos con cemento Portland. Las reacciones entre una solución de hidróxido de sodio y un agregado silíceo han demostrado tener correlación con el comportamiento del agregado en las estructuras del hormigón, y deben usarse donde se estén evaluando nuevas fuentes de áridos, o para prevenir la reactividad álcali-sílice. Los resultados de este método de ensayo son rápidos de obtener y, aunque no son del todo confiables para todos los casos, proporcionan unos datos útiles que pueden mostrar necesidad de obtener información adicional a través de los métodos descritos en las NTC 6222 - Método de ensayo para determinar el potencial de reactividad de los áridos al álcali (método de barras de mortero) (ICONTEC, 2017).

3.1.3.7 Método de ensayo para determinación de partículas livianas en los áridos – NTC 130.

Esta norma se utiliza para determinar el cumplimiento de los requisitos relacionados con la cantidad de material liviano en los áridos finos y gruesos. Para separar las partículas que pueden ser clasificadas como carbón o lignito, se emplea un líquido de alta densidad con una gravedad específica de 2,0. Para verificar los porcentajes de otras partículas livianas, tales como el chert, pueden emplearse líquidos de mayor densidad que tenga una gravedad específica inferior a 2,4. (ICONTEC, 1994).

3.1.3.8 Determinación del contenido de azufre en los áridos pétreos. INV E-233-13

Este método de ensayo brinda un procedimiento para la determinación cuantitativa del azufre presente en los áridos. La presencia de compuestos de azufre en los áridos, en forma de sulfatos o de sulfuros, puede dar lugar a compuestos expansivos en las estructuras de hormigón, con la consecuente destrucción de la obra, además de producir eflorescencia y depósitos en la superficie.

Una muestra de ensayo se trata con bromo y ácido nítrico para transformar en sulfatos todos los compuestos de azufre presentes en los áridos. Los sulfatos se precipitan y pesan en forma de sulfato de bario. El contenido de azufre se expresa como porcentaje en masa del agregado seco (INVIAS, 2013b).

3.1.3.9 Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto - NTC 127

Esta norma presenta un procedimiento para la determinación aproximada de la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales para el agregado fino usado en mortero de cemento hidráulico o en hormigón. El principal valor de esta norma es advertir la presencia de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas. Cuando una muestra sometida a este ensayo produce un color más oscuro que la solución de color estándar es aconsejable llevar a cabo el ensayo acerca del efecto de las impurezas orgánicas en la resistencia de mortero, de acuerdo con el método de ensayo presentado en la NTC 579 (ICONTEC, 2024b) y determinar el efecto de las impurezas orgánicas en los áridos finos sobre la resistencia del mortero (ICONTEC, 2000b).

3.1.4 Procesamiento de la información

La caracterización y valoración de los áridos se ha hecho con base en la distribución litológica y su calidad. La calidad está determinada por sus propiedades físicas y químicas, y es una combinación de estos dos parámetros. Los aspectos nocivos y los elementos contaminantes han sido considerados para la respectiva valoración (Tablas 23, 24). Los parámetros se han corroborado o desvirtuado, de manera regional, con ensayos físicos y químicos en muestras de material de la unidad de roca, y con la situación especial regional, tal como meteorización extensiva o cizallamiento de las rocas, con el objeto de dar una visión regional de sus características. Los términos utilizados para describir los grados relativos de calidad física y química de los áridos naturales y de las fuentes para áridos de machaqueo se describen en la tabla 25.

Tabla 19. Constituyentes indeseables en los áridos para hormigón

Árido porosos	Estos materiales incrementan la demanda de agua de la mezcla cuando son utilizados en el hormigón, lo cual tiene un detrimento con la resistencia y durabilidad del concreto
Reacción Álcali – Carbonato	Carbonatos dolomíticos
Arcilla, limo y polvo	Material fino incrementa la demanda de agua de la mezcla. Los recubrimientos de polvo en las partículas de áridos inhiben la adhesión del cemento.
Micas	Moscovita, biotita y clorita. La mica libre es indeseable en los áridos para hormigón y mortero porque incrementa la demanda de agua y disminuye la resistencia
Cloruros	Los cloruros pueden iniciar la corrosión de los refuerzos en el hormigón.
Conchas	Debido a su forma, los fragmentos de cáscara aumentan la demanda de agua de los áridos de hormigón
Materia orgánica	Carbón, lignito. Impurezas potencialmente nocivas para los áridos de hormigón, ya que ciertos tipos pueden retrasar/impedir el fraguado del cemento
Álcalis	Altos niveles de iones metálicos alcalinos (sodio y potasio) pueden causar una reacción álcali-agregado (AAR) en el concreto (en presencia de agregado reactivo y agua).
Sulfuros y sulfatos	La pirita de hierro (sulfuro de hierro) se encuentra en algunos depósitos de áridos. Algunas piritas se oxidan cuando se incorporan en el árido de hormigón y pueden causar expansión y manchas marrones en las superficies de concreto.

Fuente: [Ingham \(2013\)](#)

Tabla 20. Reactividad Álcali-Sílice de constituyentes de rocas, minerales y áridos para hormigón

Reactividad baja	Reactividad normal	Reactividad alta
Escorias de alto horno refrigeradas por aire	Arcosa ⁴	Calcedonia o sílice calcedónica
Anfibolita ¹	Brecha	Cristobalita
Andesita ¹	Chert	Grawaca (triturada)
Chalk	Pedernal	Tridimita
Diorita y microdiorita ¹	Granulita ¹	Desecho de demolición reciclado
Dolerita (diabasa) ¹	Grawaca (no triturada)	
Dolomita ²	Arenisca ⁴	
Arcilla/shale/pirita	Cornubiana ¹	
Feldespato	Cuarcita ⁴	
Gabro ¹	Riolita ¹	
Gneis ¹	Arenisca y arcillolita ⁴	
Granito y microgranito ¹	Toba ¹	
Caliza ²	Vidrio volcánico	
Mármol ²		
Cuarzo ³		
Esquisto ¹		
Ceniza de combustible pulverizado sinterizado		
Pizarra, Traquita ¹		
Sienita y microsienita ¹		

Tabla 24. Reactividad Álcali-Sílice de constituyentes de rocas, minerales y áridos para hormigón (Continuación)

- 1 Tipo de roca que generalmente no es reactivo al Álcali – Sílice, pero que ocasionalmente puede contener formas reactivas de sílice (posiblemente inclusiones de ópalo, calcedonia, tridimita, vidrio desvitrificado, cuarzo microcristalino o criptocristalino, cuarzo submicroscópico o desordenado)
- 2 Las calizas, dolomitas y mármoles silicificados pueden ser reactivos debido a la presencia de microcristales o cuarzo criptocristalino diseminados.
- 3 Ni cuarcita, ni cuarzo microcristalino o criptocristalino. Además, el cuarzo altamente desordenado y la sílice submicroscópica es potencialmente reactiva.
- 4 Las areniscas pueden contener ocasionalmente formas reactivas de sílice como cuarzo microcristalino o criptocristalino, cuarzo tensado o desordenado, ópalo, calcedonia. La grauvaca puede ser altamente reactiva a los álcalis (cuando se tritura) y se considera separadamente de otras areniscas
- 5 El vidrio volcánico puede ser reactivo si el vidrio no cristalino se ha desvitrificado para volverse cristalino muy fino

Fuente: Compilado de EN 7943 (European Standard, 1999) y BRE Digest 330 (Livesey, 2009) por Ingham (2013)

Tabla 21. Términos utilizados para describir los grados relativos de calidad física y química de los áridos naturales

Calidad Física	
Término	Definición
Satisfactorio	Materiales duros a firmes, relativamente libres de fracturas y en formas diferentes a lascas; la absorción por capilaridad es muy pequeña a nula, y la textura de la superficie es relativamente rugosa
Aceptable	Los materiales exhiben una o dos de las siguientes características: firmes a friables; moderadamente fracturado; absorción de capilaridad pequeña a moderada; plano o en lascas; superficie relativamente suave e impermeable.
Pobre	Los materiales exhiben una o más de las siguientes características: friable a pulverulento; altamente fracturado, absorción por capilaridad moderada a alta; cambio de volumen marcado al mojarse y secarse; combinación de tres o más cualidades del tipo “aceptable”.
Calidad Química	
Término	Definición
Inofensivo	Los materiales no contienen constituyentes que puedan reaccionar químicamente de una manera significativa con los constituyentes de la atmósfera, agua o con el hormigón de cemento portland cuando se encuentren dentro del hormigón o el mortero en condiciones ordinarias.
Potencialmente Nocivo	Los materiales contienen una o varios constituyentes en proporción significativa y que sea conocida su reacción química bajo condiciones ordinarias en el hormigón de cemento portland o en el mortero de tal manera que produzca un cambio significativo de volumen, que interfiera con el curso normal de la hidratación del cemento portland, o provea sustancias que podrían producir efectos perjudiciales sobre el hormigón o el mortero.

Fuente: Modificado de [Langer & Knepper \(1995\)](#), [Langer \(2016\)](#)

3.1.5 Estructuración informática del producto

Interpretación de los resultados de laboratorio y preparación del informe con una síntesis sobre los diversos componentes del mapa y una descripción de la distribución y la calidad de los áridos naturales.

Finalmente, se elaboraron las bases de datos y se instalaron en un sistema de información georreferenciada de ArcGis con un Archivo mxd y la carpeta con datos ([Anexo 1](#)).

3.2 Muestreo de materiales

El muestreo para la caracterización y valoración de las fuentes potenciales de áridos naturales se hizo basándose en los mapas geológicos a escala 1: 100 000. Las unidades de roca fueron reconocidas en campo en varios lugares en los cuales fueron tomados datos de campo encaminados a determinar una calidad física y química preliminar y se tomaron muestras de roca para realizar en ellas los ensayos físicos y químicos que permitieron precisar, de manera regional, el comportamiento de estos materiales como fuentes potenciales de áridos naturales.

El muestreo de material rocoso con potencialidad para ser utilizado como árido natural se hizo teniendo en cuenta los siguientes tipos de depósito:

- Estratos de arena y grava
- Macizos rocosos y estratos arenosos
- Macizos rocosos de rocas ígneas para áridos de machaqueo.
- Macizos rocosos de rocas metamórficas para áridos de machaqueo.

La ubicación de las muestras puede verse en la [Figura 14](#) sobre el mapa geológico. Todas las coordenadas Norte y Occidente corresponden al sistema de coordenadas tomadas de los mapas a escala 1:100.000 publicadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), con origen Bogotá. Las muestras tienen su registro gráfico en el proyecto de ArcGis ([Anexo 1](#)).

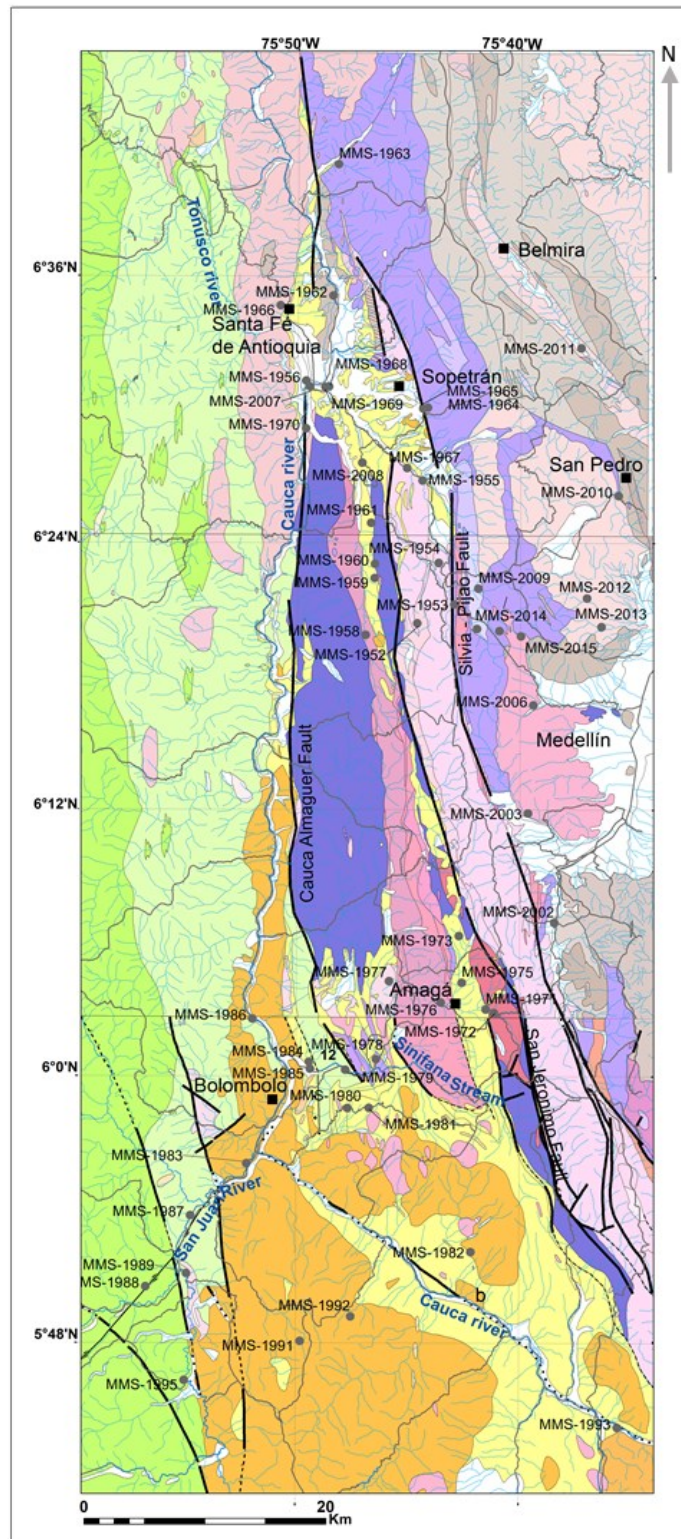


Figura 14. Localización de los puntos de toma de información y muestras de roca en las unidades litoestratigráficas. Fuente: Modificado de Calle et al. (1980); Mejía et al. (1983a); Mejía et al., (1983b)

3.2.1 Estratos de arena y grava

Muestras de roca tomadas en los depósitos no consolidados (aluviones recientes) y en algunas capas de formaciones sedimentarias (Tabla 26).

Tabla 22. Lista de muestras tomadas en estratos de arena y grava

Código	Municipio	Plancha 1:100000	Norte	Occidente	Unidad de Roca
MMS 1956	Santa Fe Antioquia, Río Tonusco, desembocadura al Río Cauca	130	1.212.628	807.223	Aluvión Reciente
MMS 1968	Sopetrán, Sector de Colfrutas, Río Cauca	130	1.212.152	809.096	Aluvión Reciente
MMS 1970	Sopetrán, Quebrada La Seca	130	1.208.679	807.206	Aluvión Reciente
MMS 1982	Vía Fredonia-Marsella	166	1.140.324	820.801	Combia, Formación. (Volcano sedimentario)
MMS 1983	Salgar, desembocadura Río San Juan al Río Cauca	166	1.147.705	802.263	Aluvión Reciente
MMS 1985	Bolombolo, Desembocadura Quebrada Sinifaná al Río Cauca	166	1.155.543	807.513	Aluvión Reciente
MMS 2007	Vía Santa Fe de Antioquia – San Jerónimo. Puente.	130	1.211.764	806.620	Amagá, Formación.; Miembro Inferior
MMS 2011	Vía San Pedro - Belmira	130	1.215.308	829.979	Aluvión Reciente

3.2.2 Macizos rocosos y estratos de arena

Material, tamaño arena, tomado en unidades de roca en su nivel V del perfil de meteorización, correspondiente a “Fuerte meteorización”, en barras arenosas de aluviones recientes y en algunos niveles de rocas estratificadas (Tabla 27)

Tabla 23. Lista de muestras de materiales potenciales para arena

Muestra	Municipio	Plancha 1:100000	Norte	Occidente	Unidad de Roca
MMS 1969	Sopetrán, Sector de Colfrutas, Río Cauca	130	1.212.106	808.819	Aluvión Reciente
MMS 1971	Amagá, Quebrada La Maní	130	1.160.443	822.053	Amagá, Stock de
MMS 1983	Salgar, desembocadura Río San Juan al Río Cauca	166	1.147.705	802.263	Aluvión Reciente
MMS 1986	Bolombolo Río Cauca, Playa Pacho,	166	1.155.543	807.513	Aluvión Reciente
MMS 1999	Rionegro, Vereda Yarumal	147 ²	1.174.963	846.501	Antioqueño, Batolito
MMS 2002	Variante Caldas- Medellín	146	1.167.621	827.722	Neis de la Miel
MMS 2007	Vía Santa Fe de Antioquia – San Jerónimo. Puente.	130	1.211.764	806.620	Amagá, Formación.; Miembro inferior
MMS 2012	Vía San Pedro – San Félix	146	1.194.536	830.446	Antioqueño, Batolito

3.2.3 Macizos rocosos para áridos de machaqueo

Material muestreado en unidades de roca fresca, no meteorizada, que requerirá un procesamiento que incluye la trituración para ser utilizada como áridos en hormigón o pavimentos (Tabla 28).

Tabla 24. Lista de muestras potenciales para áridos de machaqueo

Código	Municipio	Plancha 1:100000	Norte	Occidente	Unidad de Roca
MMS 1952	Medellín	146	1.192.022	821.331	Palmitas, Gneis de
MMS 1953	Medellín	146	1.194.059	819.462	Romeral, Gabro de
MMS 1954	Ebéjico	146	1.197.502	818.190	Quebradagrande, Complejo
MMS 1957	Ebéjico	146	1.192.500	816.400	Heliconia, Diorita de
MMS 1958	Ebéjico	146	1.212.628	807.223	Pueblito, Diorita de
MMS 1959	Ebéjico	130	1.196.257	812.766	Ultramáfico
MMS 1962	Santa Fe de A.	130	1.219.692	809.466	Sucre, Anfibolita de
MMS 1964	Sopetrán	130	1.210.325	816.658	Cajamarca, Complejo de
MMS 1966	Santa Fe de A.	130	1.218.896	805.114	Sabanalarga, Batolito de
MMS 1967	Santa Fe de A.	130	1.205.378	815.566	Quebradagrande, Complejo
MMS 1972	Amagá	146	1.160.153	822.738	Amagá, Stock de
MMS 1976	Amagá	130	1.160.821	819.070	Pueblito, Diorita de
MMS 1977	Titiribí	146	1.162.800	814.058	Andesíticos hornbléndicas Pórfidos
MMS 1979	Titiribí	166	1.155.457	810.433	Barroso, Basaltos de
MMS 1981	Venecia	166	1.152.092	814.370	Andesíticos hornbléndicas, Pórfidos
MMS 1987	Salgar	166	1.143.405	797.608	Barroso, Basaltos de
MMS 1989	Hispania	166	1.138.608	797.266	Hispania, Gabro de
MMS 1991	Pueblo Rico	166	1.132.960	806.667	Combia, Formación
MMS 1992	Jericó	166	1.135.000	810.850	Combia, Formación
MMS 1993	Pintada	166	1.125.762	832.914	Cambumbia, Stock
MMS 1998	El Retiro	147 ¹	1.170.969	850.784	Medellín, Anfibolitas de
MMS 2000	Rionegro	147 ¹	1.174.789	845.885	Medellín, Anfibolitas de
MMS 2001	Envigado	147 ¹	1.168.985	837.470	Retiro, Gneises y migmatitas
MMS 2004	Bello	147 ¹	1.191.276	837.800	Medellín, Dunitas de
MMS 2009	Medellín	146	1.195.713	821.192	Cajamarca, Complejo; Cornu- bianas
MMS 2013	Medellín	146	1.192.178	831.644	Antioqueño, Batolito
MMS 2015	Medellín	146	1.191.232	825.240	Altavista, Stock de
MMS 1960	Ebéjico	130	1.197.436	812.893	Sinifaná, Metasedimentitas de
MMS 1963	Liborina	130	1.230.595	809.922	Cajamarca, Complejo de
MMS 1965	Sopetrán	130	1.210.394	817.279	Cajamarca, Complejo de
MMS 1978	Titiribí	166	1.156.325	812.974	Arquíá, Complejo(Sabaletas)
MMS 2014	Medellín	146	1.191.627	823.854	Cajamarca, Complejo; Cor- neanas

4. Marco geológico

El área de estudio está representada por tres cinturones geológicos alargados en dirección Norte-Sur en el borde noroeste de la Cordillera Central y un cuarto cinturón en el borde oriental de la Cordillera Occidental, ramales pertenecientes a la parte norte de los Andes de Suramérica. Los cinturones están delimitados regionalmente por las fallas Silvia-Pijao, San Jerónimo y Cauca-Almaguer (Maya y González, 1995) y se describen de Este a Oeste a continuación (Figura 15).

4.1 Cinturón al Este de la Falla Silvia - Pijao

Este cinturón de rocas metamórficas de medio a alto grado afectado por un magmatismo cretácico está compuesto por las siguientes unidades litoestratigráficas y litodémicas:

Migmatitas y gneises: Gneises y granofels de cuarzo feldespato con biotita intercalados con gneises de biotita, a menudo con sillimanita. Estas rocas tienen estructuras estromáticas, plegadas, flebíticas y migmatíticas augen (Rodríguez et al., 2005). La unidad se caracteriza por una profunda alteración y, generalmente, desarrolla varios metros de saprolito de color púrpura claro con manchas ocres, rojas y blancas que marcan la foliación original de la roca (Rodríguez et al., 2005).

Granulitas y Neises del Retiro. Al suroccidente de Medellín, se presenta el conjunto de rocas que corresponden a un conjunto metamórfico que incluye migmatitas cuarzo-feldespáticas, anfibolitas, cuarcitas, esquistos biotíticos y sillimaníticos, esquistos cummingtoníticos y granulitas piroclásticas (Restrepo y Toussaint, 1984, (Rodríguez et al., 2005).

Anfibolita de Caldas: Esta roca está compuesta, principalmente, por anfíboles, plagioclasas y granate porfidoblástico concentrados en bandas, con cuarzo y biotita subordinados. Estas rocas tienen minerales fuertemente orientados en la foliación S_1 . Las capas intercaladas de esquisto de biotita-estaurolita son comunes y exhiben contactos abruptos (Bustamante y Juliani, 2011).

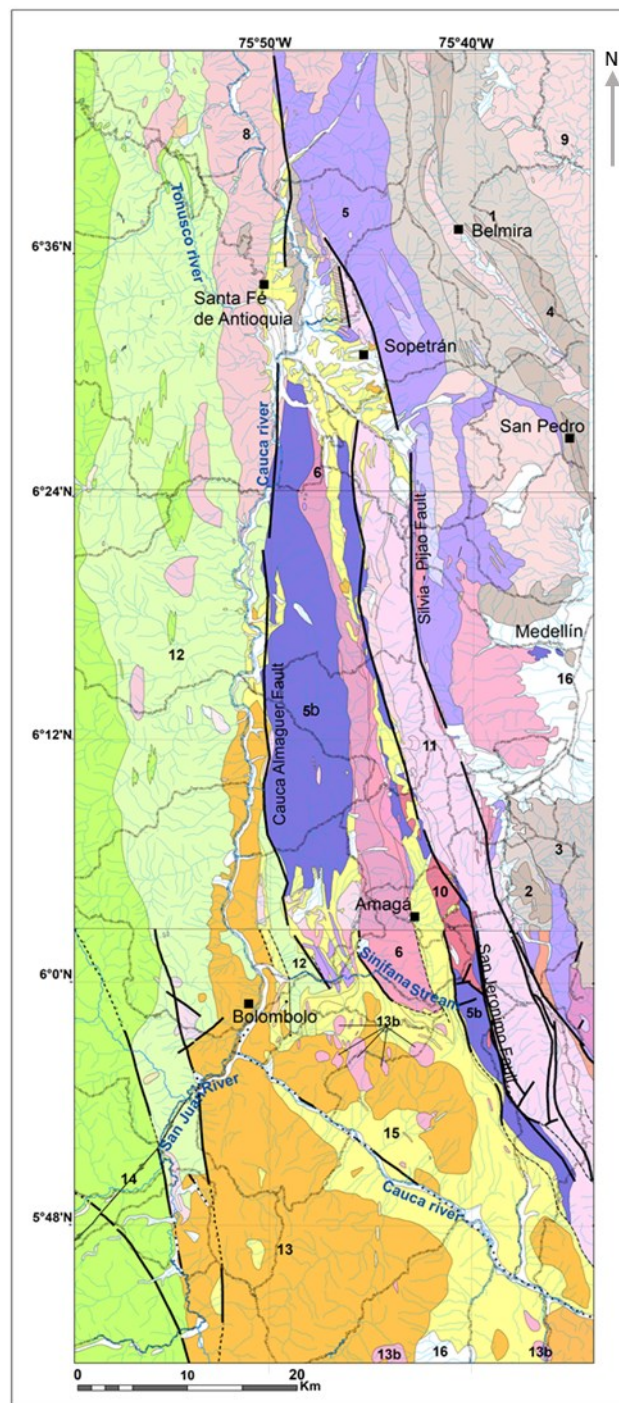


Figura 15. Distribución de unidades litoestratigráficas en el área de investigación.

Fuente: Modificado de Calle et al., 1980; Mejía et al., 1983a; Mejía et al., 1983b. Unidades: 1—Migmatitas y gneises, 2—Anfibolita de Caldas, Metaharzburgita de Medellín, 4—Anfibolita y gneis anfibólico, 5—Complejo de Cajamarca, 5b—Complejo Arquía, 6—Diorita de Pueblito, 7—Stock de Altavista, 8—Batolito de Sabanalarga, 9—Batolito Antioqueño, 10—Stock de Amagá, 11—Complejo Quebradagrande, 12—Grupo Cañasgordas (Basaltos de Barroso), 13—Formación Combia, 13b—Rocas hipoabisales, 14—Grupo Cañasgordas (Miembro Sedimentario), 15—Formación Amagá, 16—Depósitos Cuaternarios. Línea azul: río; doble línea discontinua: carretera.

Metaharzburgita de Medellín: constituye un fragmento de manto litosférico oceánico formado en un escenario de arco incipiente de cuenca de arco posterior emplazado en el margen continental occidental de Pangea durante el período Triásico (García-Casco et al., 2020). Las rocas de esta unidad por lo general se encuentran extremadamente meteorizadas y en las zonas con pendientes moderadas a bajas, desarrollan perfiles profundos de meteorización, cuya característica principal es la textura arcillosa, color rojo intenso, consistencia dura y la presencia de óxidos de hierro con hábitos botroidales y oolíticos (costras lateríticas), mientras que en las zonas con altas pendientes, los suelos son erosionados continuamente debido a la escasa o nula cobertura vegetal, manteniendo las rocas en estado relativamente frasco (Rodríguez et al., 2005)

Anfibolita y gneis anfibólico: Rocas con estructura gnéisica a esquistosa, localmente masivas a bandeadas. El tamaño del grano varía de fino a medio. El color predominante es el negro moteado de blanco con un tinte verdoso oscuro por urazitización y cloritización de la hornblenda y foliación definida por la orientación plana de la hornblenda (Rodríguez et al., 2005).

Anfibolitas de Medellín. Unidad compuesta por anfibolitas diopsídicas, anfibolitas cumingtoníticas, anfibolitas granatíferas, esquistos actinolíticos y esquistos biotíticos. La mineralogía de la anfibolita es hornblenda y plagioclasa, con cantidades menores y variables de diópsido, cuarzo y esfena, y como accesorios circón, apatito y biotita. Granate y cumingtonita se presentan en algunas variedades. La textura es variable, presentando un cambio de grano medio a grano fino, aunque algunas veces presenta tamaño grueso, con aspecto de gabro saussurítico. (Restrepo, 1986).

El perfil generalizado de meteorización de la anfibolita de Medellín se compone de un nivel de suelo (VI) de color crema a gris claro que localmente presenta incidencia de cenizas volcánicas, un nivel saprolítico de color pardo amarillento a pardo rojizo característico, producido por la alteración de la hornblenda y que localmente presenta un bandeamiento débil con capas finas de color blanco a amarillo pálido producido por la alteración de zonas ricas en plagioclasa. Este saprolito puede variar en la coloración a gris verdoso, pero por lo general predominan los tonos pardos debido a la abundancia de hornblenda en la composición mineralógica de las anfibolitas y puede contener bloques de roca relativamente fresca (Rodríguez et al., 2005).

Gneis de la Miel: esta unidad se encuentra localizada en la cercanía al municipio de Caldas. Es un cuerpo de rocas graníticas, en el sentido industrial, que sufrió un

proceso de metamorfismo, o sea que fue afectado por condiciones de presión y temperatura diferentes a las originales que formaron la roca ígnea. Esta roca es de color gris claro, grano grueso con granos observables a simple vista, compuesto por feldespatos potásicos fuertemente alterados a arcillas, plagioclasa, cuarzo, moscovita y biotita. Además, contiene circón, apatito y óxidos de hierro. Esta unidad está localizada en el extremo sur oriental del área de investigación (González, 2001).

El Gneis de Palmitas varía composicionalmente de granito a granodiorita. La roca principalmente es un gneis, presenta estructuras augen neis, foliación paralela y discontinua y en ocasiones se observan como granofelsas. La roca está compuesta por minerales de cuarzo, plagioclasa, feldespato y biotita. Presenta tamaño de grano grueso, con cristales de hasta 3 cm de diámetro, coloración dominante gris a blanca con moteado negro, foliación paralela, discontinua y espaciada (Zapata-Villada et al., 2022)

Complejo Cajamarca: unidad compuesta por rocas metasedimentarias y metabásicas. Su formación se atribuye a una zona de subducción del Pérmico, magmatismo de arco volcánico, apertura y cierre de cuencas y acreción de terrenos. Los esquistos, de protolito sedimentario, están formados principalmente por cuarzo, moscovita, biotita, grafito, andalucita y como minerales accesorios presentan titanita y circón; Las rocas metabásicas están compuestas por epidota, actinolita, clorita, hornblenda y plagioclasa (Madrid-Restrepo, 2021).

Stock de Altavista: Este cuerpo tiene dos facies; una con composición granodiorítica predominantemente de grano medio representada por plagioclasa andesina, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda y biotita, con minerales accesorios que incluyen apatito, circón, titanita y minerales opacos. La segunda facies es diorítica, que se encuentra comúnmente como enclaves dentro de la facies félsica y se caracteriza por tener una plagioclasa intermedia, cuarzo, anfíbol y biotita (Cardona et al., 2020).

Batolito Antioqueño: Cuerpo intrusivo formado por tonalita y granodiorita y, ocasionalmente, cuarzdiorita y diorita. Aunque gran parte de la superficie está erosionada, se pueden ver afloramientos de roca fresca en los taludes de la carretera. En general, se presenta como una roca ígnea fanerítica masiva, holocristalina, de grano medio a grueso (Albarracín et al., 2011). La roca está compuesta por cristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y anfíbol, con trazas de epidota, clorita y esfena (Albarracín et al., 2011).

4.2 Cinturón entre la Falla Silvia-Pijao y la Falla San Jerónimo

Este cinturón de rocas sedimentarias y volcánicas del Cretácico está compuesto por las siguientes unidades litoestratigráficas y litodémicas

Complejo Quebradagrande: vulcanitas tipo basaltos y andesitas del Albense-Aptiense, y rocas sedimentarias de afinidad oceánica que afloran en una zona altamente deformada. Se presentan sedimentos del Berriasiense - Aptiense que muestran facies sedimentarias marinas continentales a poco profundas y rocas plutónicas máficas y ultramáficas (Nivia *et al.*, 2006). El Complejo Quebradagrande está constituido por un conjunto de rocas metavolcánicas y metasedimentarias. Las rocas metasedimentarias muestran un amplio rango de variación en tamaño de grano desde brechas y conglomerados hasta areniscas conglomeráticas constituidas por cantos y gravas de rocas volcánicas y chert (Gómez *et al.*, 1995). Se presentan también intervalos espesos de milonitas producidas a partir de lodolitas carbonosas arcillosas intercaladas con horizontes delgados de calizas y chert. Los resultados analíticos muestran que las rocas volcánicas son principalmente andesitas basálticas y andesitas (Nivia *et al.*, 1996).

4.3 Cinturón entre la Falla de San Jerónimo y la Falla Cauca-Almaguer

Este cinturón de rocas metamórficas de medio grado, granodioritas y rocas ultramáficas del Jurásico y una cuenca sedimentaria del Oligoceno-Mioceno está compuesto por las siguientes unidades litoestratigráficas y litodémicas:

Complejo Arquía: Esquistos de cuarzo sericita, esquistos anfibólicos, anfibolita granatífera, esquistos actinolíticos, esquistos de grafito-moscovita-cuarzo, serpentinitas y rocas asociadas con metamorfismo de media presión (Arango-Escobar, 2021). Estos conjuntos se interpretan como rocas ígneas y sedimentarias que fueron sometidas a diferentes condiciones de presión y temperatura. La unidad de esquistos cuarzo-actinolita con clinozoisita-zoisita y epidota representan entre el 50% y el 60% del área (Arango-Escobar, 2021).

Diorita de Pueblito: La litología corresponde a diorita y, localmente, gabro pegmatítico. La composición predominante es diorítica con anfíboles como máficos predominantes y gabros anfibólicos saussuritizados como facies límite tanto al Este como al Oeste del cuerpo principal (González y Londoño, 2002).

Diorita de Heliconia: La roca predominante es de grano medio a fino, con cambios transicionales a rocas básicas finogranulares, de textura ofítica, especialmente hacia los bordes del cuerpo y por lo general con efectos dinámicos notorios, tanto en muestra de mano como a nivel microscópico. La composición normal es de una diorita cuarzosa con plagioclasas y cuarzo en menor proporción, como minerales félsicos, que predominan sobre los minerales máficos, hornblenda con biotita ocasional. La plagioclasa aparece con alteración a saussurita. El cuarzo es accesorio, intersticial entre plagioclasa y presenta extinción ondulatoria fuerte. La hornblenda es verde y por alteración pasa a biotita y clorita. Los accesorios son magnetita, rara vez ilmenita, apatito y circón (González, 2001).

Stock de Amagá: La roca predominante es maciza, granular a porfídica, de grano medio a grueso, de color rosa a gris claro moteado, con biotita negra. La textura es granular hipidiomórfica y la composición varía entre cuarzomonzonita y granodiorita (González, 2001). La roca predominante es maciza, granular a porfídica, grano medio a grueso, color moteado rosado a gris claro, con biotita negra. La textura es hipidiomórfica granular y la composición varía entre cuarzomonzonita y granodiorita. Esta roca contiene regularmente cristales de feldespato potásico de 0,5 cm hasta 2 cm y en su pasta o matriz se presenta cuarzo, plagioclasa, micas tipo biotita y moscovita, esfena, circón, apatito, rutilo y minerales opacos (González, 2001).

Stock de Cambumbia: es una roca fanerítica de grano medio a fino, con facies locales porfídicas, de color gris medio, moteado y cortada por diques de aplita pegmatita. La textura normal es hipidiomórfica granular, variando de equigranular a inequigranular, dando origen a texturas porfídicas. La composición predominante es de diorita piroxénica, con variación a tonalita y granodiorita en especial cerca de los diques pegmatíticos, compuesta por plagioclasa y augita y por lo general muestra una alteración propílica intensa con epidotización y carbonatación del piroxeno y piritita finogranular diseminada. En la facies porfídica la matriz es afanítica y los ferromagnesianos aparecen reemplazados por calcita y clorita (González, 2001).

Formación Amagá: Rocas siliciclásticas como litoarenitas y limolitas con mantos de carbón asociadas a secuencias fluviales continentales depositadas en el Oligoceno tardío y Mioceno tardío bajo la influencia de un componente tectónico trans-tensional en la depresión del Cauca (Sierra et al., 2003). La Formación Amagá representa ambientes asociados a ríos trenzados y ríos serpenteantes y se subdivide en dos unidades. El miembro Inferior está compuesto principalmente por conglomerados de cuarzo mal seleccionados, sublitoarenitas bien seleccionadas con altos contenidos de cuarzo, limos grisáceos masivos y mantos de carbón. El miembro superior está compuesto por vacas líticas, litoarenitas feldespáticas y limolitas verdosas y rojizas (Sierra et al., 2003; Silva et al., 2020)

Formación Combia: Esta unidad tiene un espesor total de 193 m y comprende 34 capas de toba soldada, brechas piroclásticas y aglomeradas, brechas de toba lapilli, flujos de lava basáltica, depósitos de caída y flujo de escoria (Bernet et al., 2020). Las capas se caracterizan por poseer una geometría tabular. La parte inferior de la secuencia estratigráfica presenta, principalmente, flujos de lava y tobas soldadas, mientras que la parte superior de la secuencia consiste en flujos piroclásticos de grano grueso a muy grueso (Bernet et al., 2020).

Pórfidos Andesíticos Hornbléndicos. De acuerdo con González (2001), son cuerpos constituidos por una pasta muy fina, con fenocristales de plagioclasa, biotita abundante y escasos cristales de hornblenda; algunos microlitos de plagioclasa están embebidos en matriz cuarzo-feldespática, en parte como producto de devitrificación. La principal característica de los Pórfidos Andesíticos Hornbléndicos es la presencia de fenocristales de hornblenda. Generalmente, presentan fenocristales de plagioclasa, hornblenda y augita en una pasta fina frecuentemente compuesta por vidrio volcánico. Puede presentar biotita, pirita y magnetita. Las andesitas augíticas porfídicas son cuerpos de dimensiones menores caracterizados por su textura porfídica fina y predominio de augita sobre hornblenda, aunque ésta última puede faltar. La roca predominante contiene fenocristales de plagioclasa, augita y hornblenda en una matriz fina compuesta por microlitos de plagioclasa, augita prismática y magnetita entre vidrio volcánico. Los pórfidos dacíticos aparecen tanto como una facies gradacional en cuerpos andesíticos, así como en pequeños cuerpos al occidente del Río Cauca. Se diferencian fundamentalmente de las andesitas por el contenido de cuarzo, tanto en fenocristales idiomórficos bipiramidales, como en áridos de cristales anhedrales en la matriz. El mineral máfico característico es hornblenda con o sin biotita relacionada (González, 2001).

4.4 Cinturón al oeste de la Falla Cauca-Almaguer

Este cinturón de rocas sedimentarias volcánicas y magmatismo jurásico está compuesto por las siguientes unidades litoestratigráficas y litodémicas:

Basaltos de Barroso. Esta unidad pertenece al Grupo Cañasgordas y corresponde a un conjunto vulcano-sedimentario conformado por basaltos y andesitas, junto con conglomerados, tobas y paquetes de sedimentitas marinas intercaladas y discordantes sobre rocas volcánicas. Los basaltos y andesitas de la Formación Barroso tienen una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, en una matriz hialocristalina microcristalina a microlítica (Rodríguez y Arango, 2013).

La unidad Basaltos de Barroso pertenece al conjunto de rocas llamados, regionalmente, Basaltos de La Unión (Nivia, 2001), los cuales consisten en lavas de basaltos toleíticos, sills y diques doleríticos (diabasas), esporádicos niveles de tobas básicas y localmente, picritas. Las lavas se presentan en flujos masivos y flujos de lavas almohadilladas. Las almohadillas individuales presentan márgenes de enfriamiento de 2 a 3 cm en palagonito (vidrio basáltico hidratado alterado) y, en los espacios entre almohadillas, brechas de hialoclastita cementadas con cuarzo, calcita, clorita o epidota. Localmente se presentan secuencias estratificadas de tobas básicas o marcadamente bimodales basáltico-riolítica. El espesor de estas intercalaciones normalmente no excede los 20 m. En términos generales, los basaltos y doleritas son de color verde oliva a verde grisáceo (Nivia, 2001).

Formación Penderisco. Corresponde al miembro sedimentario del Grupo Cañasgordas y es una secuencia de rocas sedimentarias de más de 3000 m de espesor tipo flysch, plegadas y falladas, que pueden interpretarse en términos de facies turbidíticas proximales. Hacia la parte superior se presentan intercalaciones de limolitas y calizas que corresponden a turbiditas distales. Al este de la secuencia, predominan las limolitas y argilitas, con bancos intercalados de grawacas y bancos de conglomerados localmente espesos (González, 2001).

Gabros de Romeral y de Hispania: unidades compuestas por gabros de grano medio a fino, foliados, con efectos dinámicos, compuestos por partes aproximadamente iguales de plagioclasa cálcica a alterada a saussurita pasando a epidota finogranular y plagioclasa sódica y augita que por uralitización se han transformado a anfíbol fibroso, el cual a su vez está alterado a clinozoisita. Algunos cuerpos corresponden a gabros hornbléndicos, caracterizados por la presencia de hornblenda

verde, fuertemente pleocroica, en contraste con la actinolita pálida, producida por uralitización (González, 2001).

Batolito de Sabanalarga: Ahora descrito como Batolito de Santa Fe (Weber *et al.*, 2015), comprende gabros, tonalitas, cuarzodioritas y dioritas. En algunos casos, los gabros muestran un aumento en el porcentaje de anfíboles y pueden clasificarse como hornblenditas. Estas unidades muestran relaciones complejas de campo. La roca más abundante es la tonalita (Weber *et al.*, 2015). La roca predominante en el Batolito de Sabanalarga es una cuarzodiorita maciza, donde predomina hornblenda sobre biotita, observándose transiciones a diorita hornbléndica por disminución en el contenido de cuarzo y a gabros hornbléndicos y hornblenditas, en especial hacia los bordes, por aumento en el contenido de hornblenda y la presencia de plagioclasa cálcica. La parte sur del cuerpo, entre Santa Fe de Antioquia y Anzá, está formada por rocas con alto grado de deformación que imprimen una textura milonítica (planos paralelos), producida por efectos dinámicos entre las fallas de Tonusco y Sabanalarga (González, 2001).

Depósitos no consolidados: zonas aluviales recientes del Cuaternario se encuentran distribuidos en toda el área de investigación. Estos depósitos corresponden a terrazas aluviales, llanuras aluviales y cauces de agua. Los depósitos aluviales están relacionados con los ríos Cauca y San Juan y una gran cantidad de las corrientes de agua menores. Además, existen grandes zonas aluviales sobre las que se asientan las localidades del área metropolitana de Medellín y la localidad de Santa Fe de Antioquia. El espesor de las zonas aluviales es muy variable, y en la ciudad de Medellín, puede alcanzar los 200 m (González, 2001). Los depósitos no consolidados están compuestos por fragmentos de diferentes litologías, mal seleccionados y sin estratificación. Sin embargo, se pueden observar horizontes bien seleccionados en algunos aluviones que se encuentran elevados con respecto al nivel actual de los ríos (González, 2001). Los depósitos no consolidados han constituido una fuente muy importante de arenas y gravas en el área de influencia de la ciudad de Medellín, especialmente, las arenas y gravas asociadas a lechos de agua.

5. Caracterización y valoración de las unidades litoestratigráficas como fuentes de áridos

En este capítulo se presenta la caracterización técnica y su valoración de las unidades litoestratigráfica de acuerdo a la calidad física y química y las observaciones de campo, junto con las consideraciones a nivel regional de las unidades litoestratigráficas y a su distribución en el área de investigación. A continuación, se describen las unidades potenciales para áridos con la siguiente clasificación:

- Depósitos no consolidados para arenas y gravas
- Depósitos no consolidados para arenas
- Rocas estratificadas con arenas y gravas
- Macizos rocosos para arenas y gravas
- Rocas ígneas para áridos de machaqueo
- Rocas metamórficas para áridos de machaqueo

5.1 Depósitos no consolidados para arenas y gravas

Este grupo corresponde a los depósitos cuaternarios que se presentan, principalmente, asociados a los ríos y corrientes de agua que cruzan la región. Generalmente, se trata de terrazas aluviales, llanuras de inundación y cauces de las corrientes de agua. Se han clasificado por sectores geográficos para simplificar su descripción. Estas unidades y sus respectivas muestras de roca pueden verse en detalle en el proyecto de ArcGis ([Anexo 1](#)).

5.1.1 Sector de Santa Fe de Antioquia – Sopetrán

Estos depósitos están localizados en la parte central del mapa 130 (Santa Fe de Antioquia) ([Figura 16](#)) y se encuentra relacionados con el Río Cauca y sus afluentes, los ríos Aurrá y Tonusco, y las quebradas La Seca y La Sopetrana, entre otras. Esta zona contiene extensos depósitos de arenas y gravas relacionados con terrazas aluviales, llanuras de inundación y cauces del río (aluviones recientes) ([Figura 17](#)) y con depósitos de derrubio. Los depósitos de este sector fueron muestreados en la desembocadura del Río Tonusco (MMS 1956), en el sitio de Colfrutas (MMS 1968-1 y MMS 1968-2) y en la Quebrada La Seca (MMS 1970).

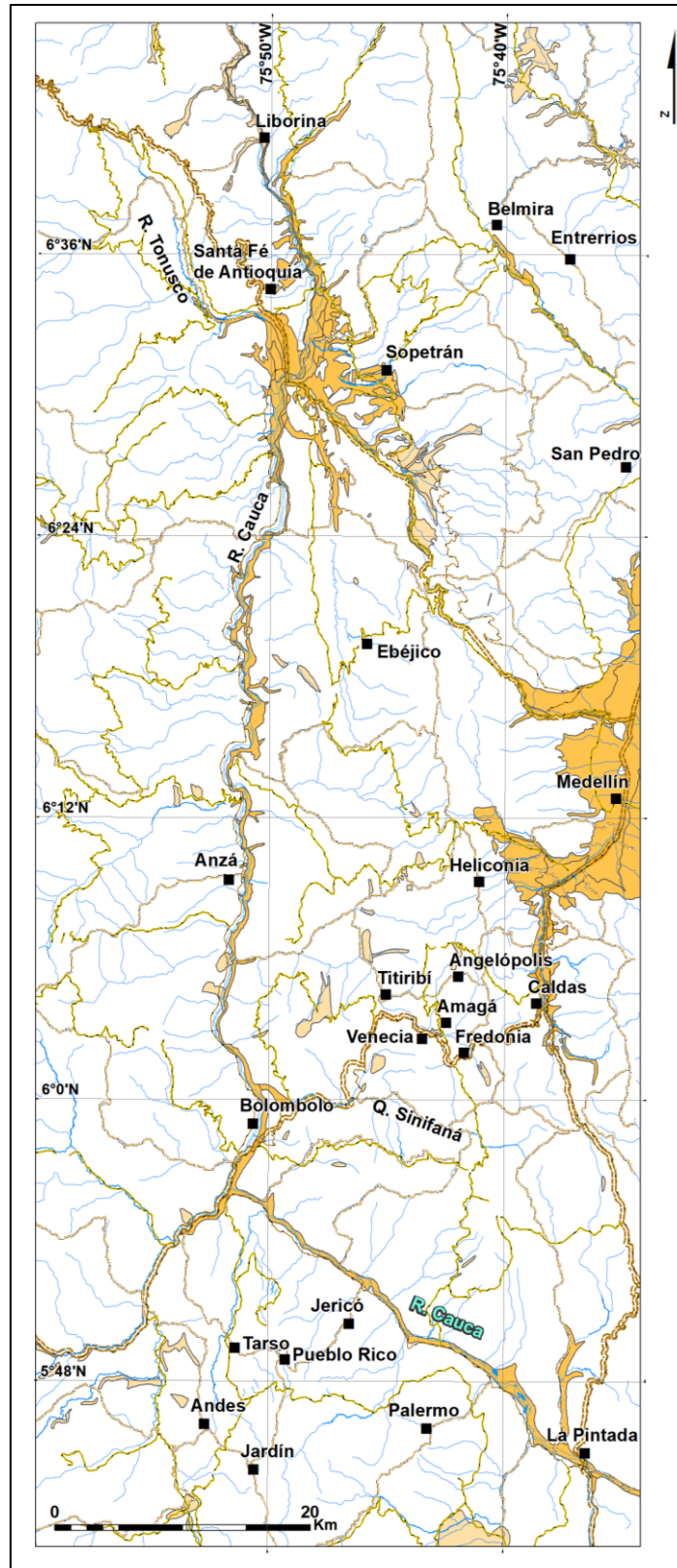


Figura 16. Distribución de las fuentes de arena y grava en depósitos no consolidados: Aluviones y terrazas (área naranja), otros depósitos no consolidados (área rosada). Ríos: línea azul; vías: línea naranja.

Fuente: Modificado de [Calle et al. \(1980\)](#); [Mejía et al. \(1983a\)](#); [Mejía et al. \(1983b\)](#).

Los resultados de los ensayos físicos (Tabla 29) realizados en los depósitos de arenas y gravas indican que todas las muestras cumplen con las especificaciones requeridas por la normativa y que pueden ser empleados como áridos sin mayor beneficio que la separación granulométrica que sea requerida en el producto final.

Tabla 25. Resultados de los ensayos físicos de los depósitos no consolidados de arena y grava

Muestra MMS	Unidad Roca	de	Árido Producto	Pasa 200 (%)	Peso esp. aparente (g/cm ³)	Absorción (%)	Desgaste Los Ángeles (%)	Terrones de arcilla y partículas deleznales (%)
Sector Santa Fe de Antioquia – Sopetrán – San Jerónimo								
1956-1	Aluvión	Re-	Fuller 1 1/2"	<u>3,24</u>	<u>2,62</u>	<u>2,41</u>	<u>16,8</u>	<u>0,47</u>
1968-1	Aluvión	Re-	Fuller 2" ⁽¹⁾	<u>0,85</u>	<u>2,67</u>	<u>1,4</u>	<u>16,6</u>	<u>0,19</u>
1968-2	Aluvión	Re-	Fuller 4"	<u>0,67</u>	<u>2,75</u>	<u>1,29</u>	<u>18,2</u>	<u>0,18</u>
1970	Aluvión	Re-	Fuller 3"	<u>1,92</u>	<u>2,74</u>	<u>1,39</u>	<u>18,5</u>	<u>0,35</u>
Sector de Bolombolo								
1983-1	Aluvión	Re-	NTC 174 ⁽²⁾	<u>0</u>	<u>2,87</u>	<u>0,9</u>	<u>9,5</u>	<u>0,1</u>
1985-1	Aluvión	Re-	Fuller de 4" ⁽³⁾	<u>1,2</u>	<u>2,88</u>	0,6	<u>13,4</u>	<u>0,34</u>
Sector de San Pedro – Belmira								
2011-1	Aluvión	Re-	Fuller de 4" ⁽²⁾	<u>2,12</u>	<u>2,73</u>	<u>1,54</u>	<u>29,4</u>	<u>0,22</u>

(subrayado): Valor aceptable, ### (no subrayado): Valor no aceptable

Ver Tabla 6 para consultar las especificaciones requeridas. (1) Mejorar para Fuller de 2". (2) Banda granulométrica No. 2. (3) Mejorar para Fuller de 4".



Figura 17. Depósitos de arenas en el Río Cauca, vía Santa Fe de Antioquia – Sopetrán. Fotografía: el autor

Empleando el Método de 50 cantos (Langer & Lindsey, 1999), consistente en la recolección de 50 cantos que estén entre los tamaños 40 y 19,5 mm (1 ½” y ¾”), se hizo el análisis basándose en los parámetros de litología, angulosidad y forma. La tabla 30 presenta la composición litológica de las muestras “50 cantos” tomadas en depósitos de arenas y gravas. Los depósitos localizados en los sectores de Santa Fe de Antioquia – Sopetrán (Figura 18) y Bolombolo son muy ricos en basaltos-andesitas y pórfidos andesíticos, seguido de rocas metamórficas e ígneas intrusivas (Tabla 30, Figura 19). El depósito de Belmira es muy rico en anfibolitas.



Figura 18. Extracción de arena y grava en la desembocadura del río Tonusco al río Cauca.

Fotografía: el autor.

Tabla 26. Composición litológica de los depósitos no consolidados con arena y grava, de acuerdo al método de los 50 Cantos.

Muestra MMS	An-fi-bo-lita	Ba-salto/Dia-basa	Cuarcita/Cuarzo	Chert	Dio-rita	Es-quisto Pizarra	Gabro	Gra-nito	Pór-fido Ande-sítico	Ultra-máfico
1956-2		72		20	2				6	
1968-1.1		48	16					4	24	8
1968-2.1		60	8		16		4		12	
1970-1	8	60			8		24			
1983-3		78		8	10			2		2
1985-2		66				8			26	

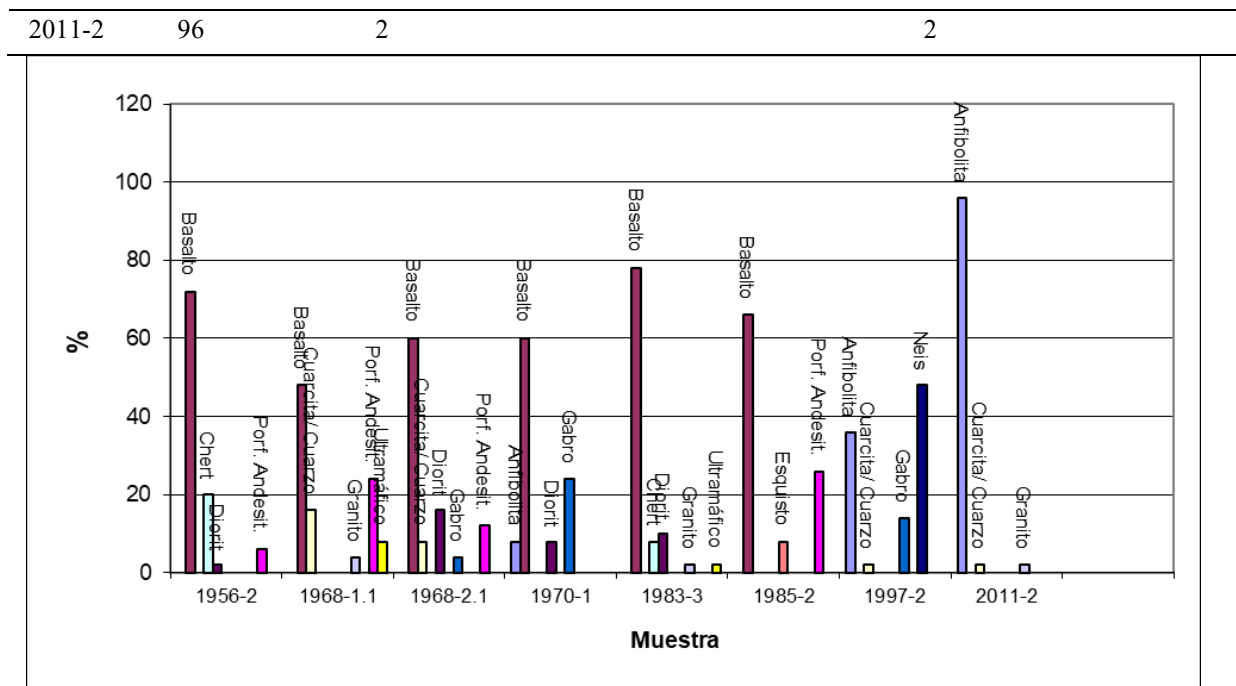


Figura 19. Composición litológica de los depósitos no consolidados con arena y grava.

Los depósitos no consolidados y estratificados presentan los grados de redondez y forma de los cantos según aparece en la [tabla 31](#). El grado de redondez indica un predominio muy marcado de los cantos subredondeados y redondeados ([Figuras 20, 21](#)). La medida de la forma (índices de aplanamiento y alargamiento) indica que los depósitos contienen partículas planas desde un 4% hasta un 18% ([Figuras 22, 23](#)), lo cual indica buenas condiciones para los valores menores de 15%, de acuerdo a la norma a la especificación requerida ([Tabla 6](#)). No se encontraron partículas elongadas.

Tabla 27. Grado de redondez y forma de los depósitos no consolidados.

Muestra MMS	Grado de Redondez*				Forma**		
	Angulosa	Sub angulosa	Sub redondeada	Redondeada	Bien Redondeada	Plana B/C >3	Elongada A/B >3
Sector Santa Fe de Antioquia – Sopetrán							
1956-2	2	26	38	30	4	0	0
1968-1.1	0	16	40	36	8	4	0
1968-2.1	0	12	32	50	6	12	0
1970-1	0	10	38	48	4	14	0
Sector de Bolombolo							
1983-3	2	22	28	42	6	8	0
1985-2	0	34	54	12	0	6	0
Sector de San Pedro – Belmira							
2011-2	0	14	20	52	14	14	0

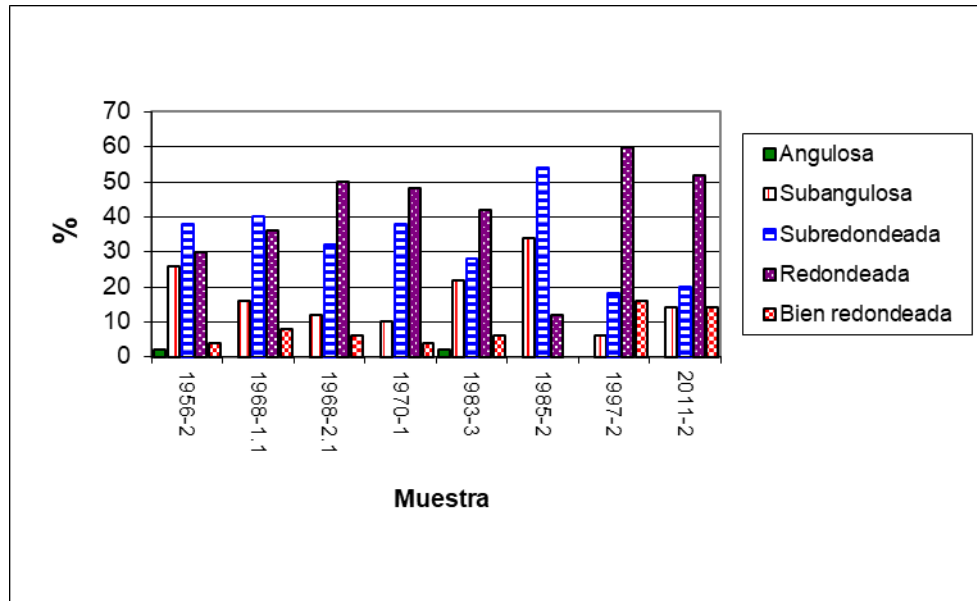


Figura 20. Medida del grado de redondez de los cantos (40 y 19,5 mm) en los depósitos no consolidados con arena y grava.

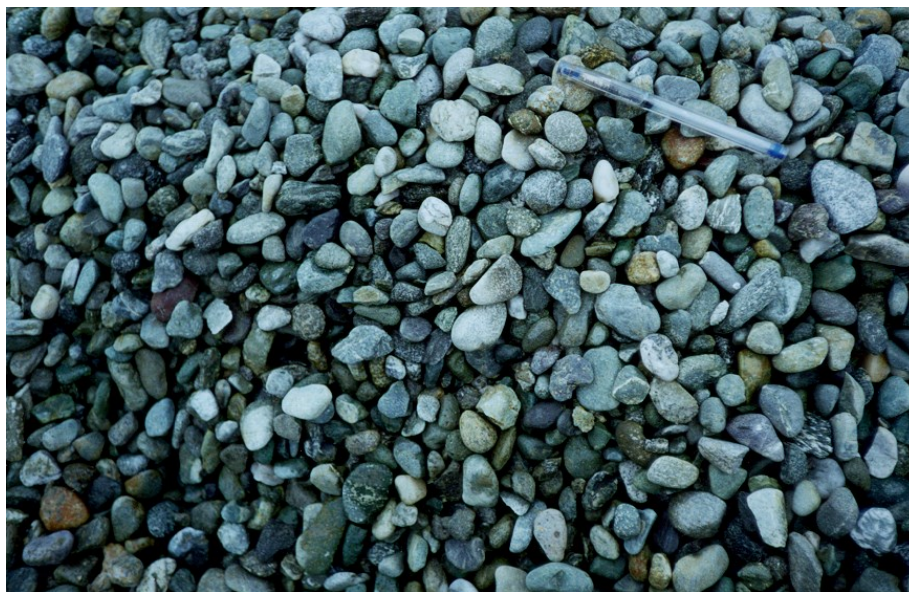


Figura 21. Muestra de gravas localizadas “in situ” sobre el aluvión del río Cauca. Forma predominante redondeada a subredondeada y composición litológica enriquecida en basalto y menos de neises y granitos. Aluvión del río Cauca cerca de Santa Fe de Antioquia. Fotografía: el autor.

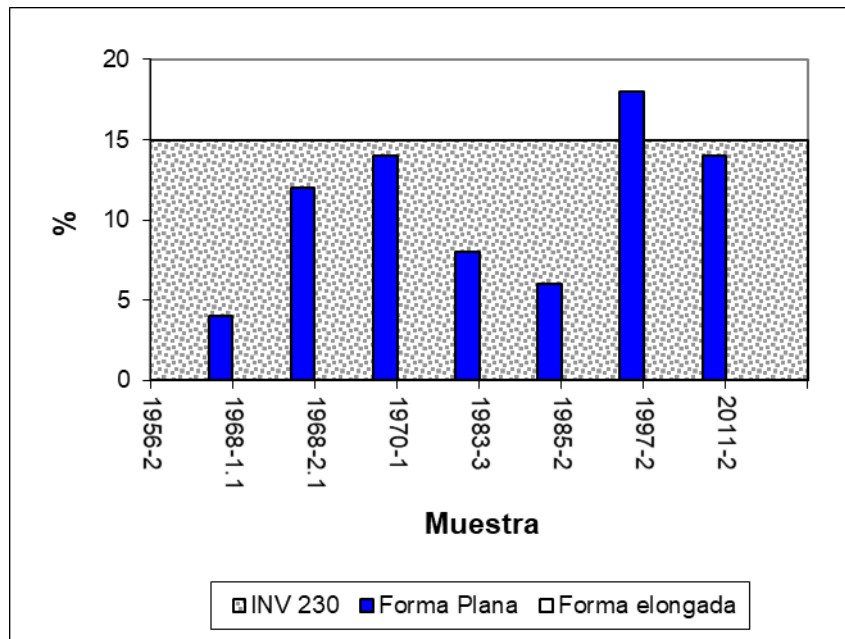


Figura 22. Medida de la Forma de los cantos (40 y 19,5 mm; 1 ½” y ¾”) en los depósitos no consolidados con arena y grava.



Figura 23. Perfil de un aluvión en la quebrada Aburrá, afluente del río Cauca. Material arena y grava.
Fotografía: el autor.

En las [figuras 24, 25, 26, 27 y 28](#) se pueden ver los resultados de ensayos hechos a material proveniente de los depósitos no consolidados y de macizos rocosos con potencialidad para ser utilizados como arenas finas y su ubicación respecto a los requerimientos de NTC e INVIAS.

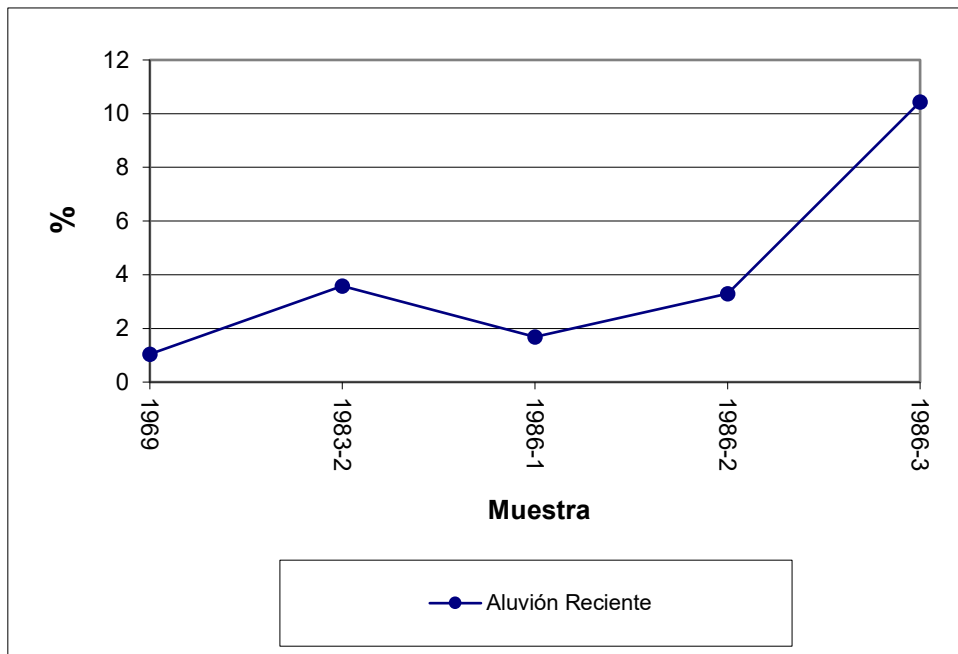


Figura 24. Localización de los datos del ensayo pasa malla No. 200 en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampostería.

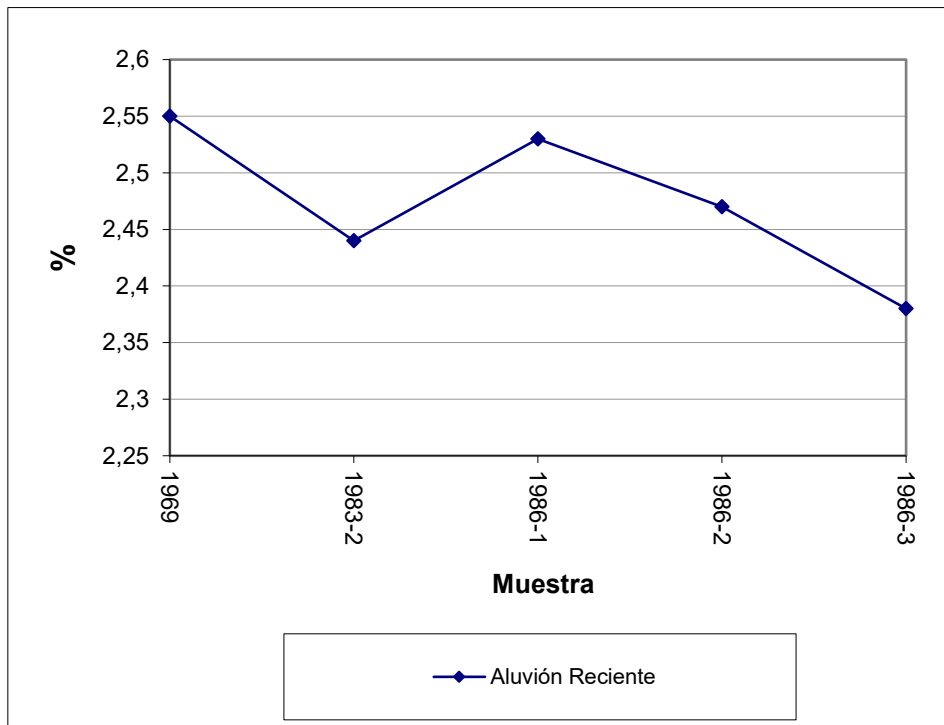


Figura 25. Localización de los datos del ensayo peso específico en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampostería

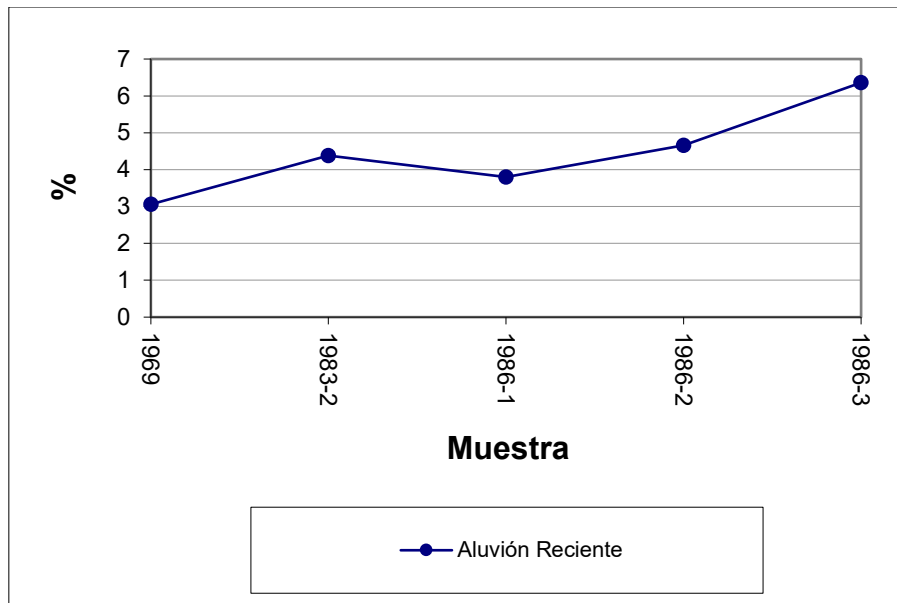


Figura 26. Localización de los datos del ensayo absorción en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampostería

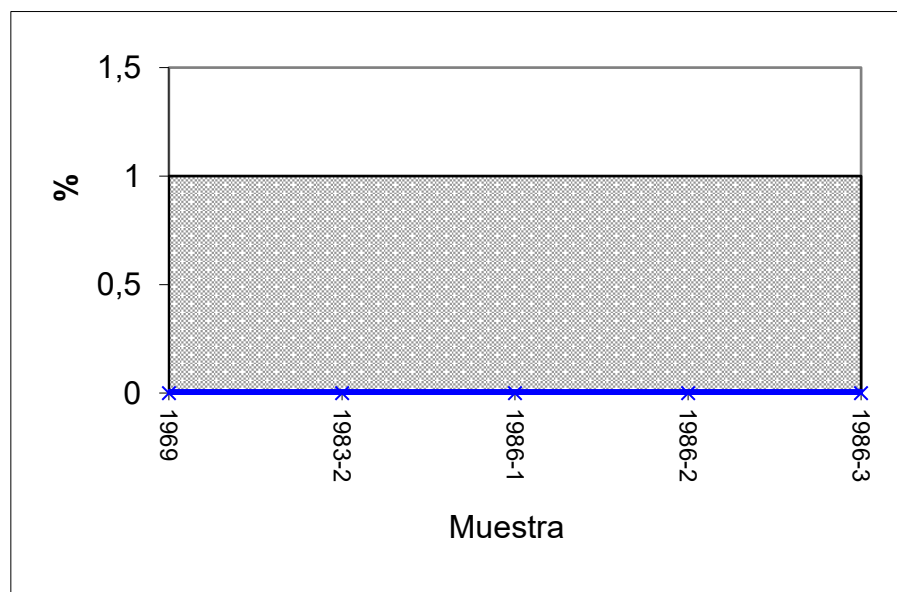


Figura 27. Localización de los datos del ensayo Terrones de arcilla y partículas delezna- bles en depósitos no consolidados de arenas con material potencial para mampos- tería

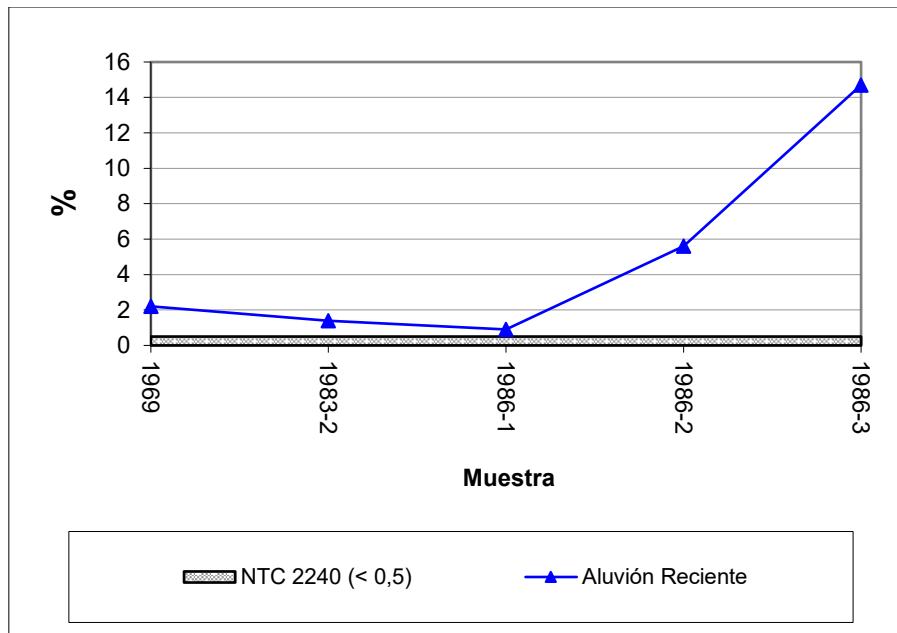


Figura 28. Localización de los resultados del ensayo partículas livianas en los depósitos no consolidados con material potencial para mampostería.

La muestra MMS 1956-1 posee una granulometría que se ajusta muy bien a un rango Fuller de 1 ½” (Figura 29), su porcentaje “Pasa 200” es inferior al 5%, cumple el requisito de desgaste en la Máquina de los Ángeles y el ensayo de Terrones de arcilla y partículas deleznable, por lo tanto, es apto para el uso como árido.

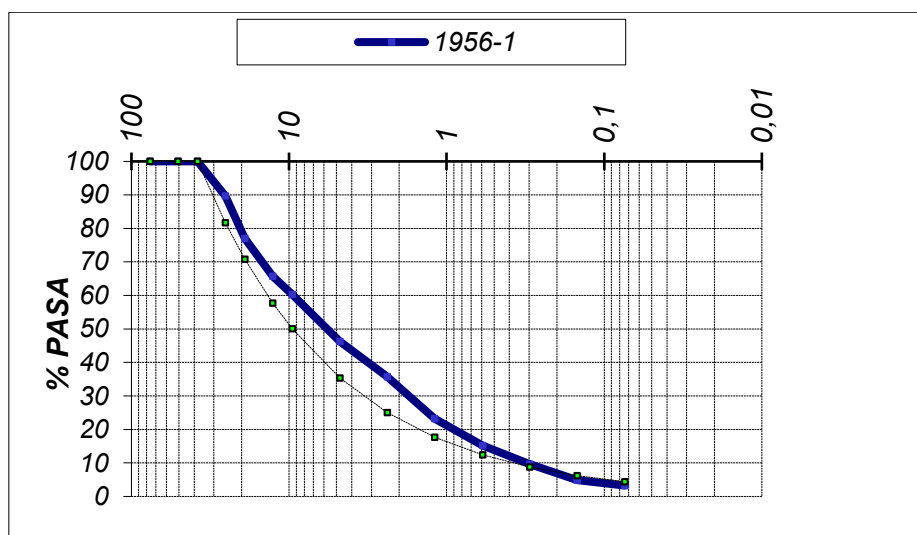


Figura 29. Distribución del tamaño de grano de la muestra MMS 1956-1

La muestra MMS 1968 –1 se trató de ajustar a un Fuller de 2” (Figura 30) pero tiene un bache en la parte de los finos; entre el tamiz No 4 y No 100 su distribución de tamaños es irregular y se debe mejorar. Sin embargo, cumplió los demás parámetros físicos (desgaste en la Máquina de los Ángeles, material pasa 200 y terrones de arcilla).

La muestra MMS 1968–2 se ajusta a un Fuller de 4” (Figura 31), es limpia y cumple con los requisitos de los otros parámetros físicos estipulados por la NTC-174.

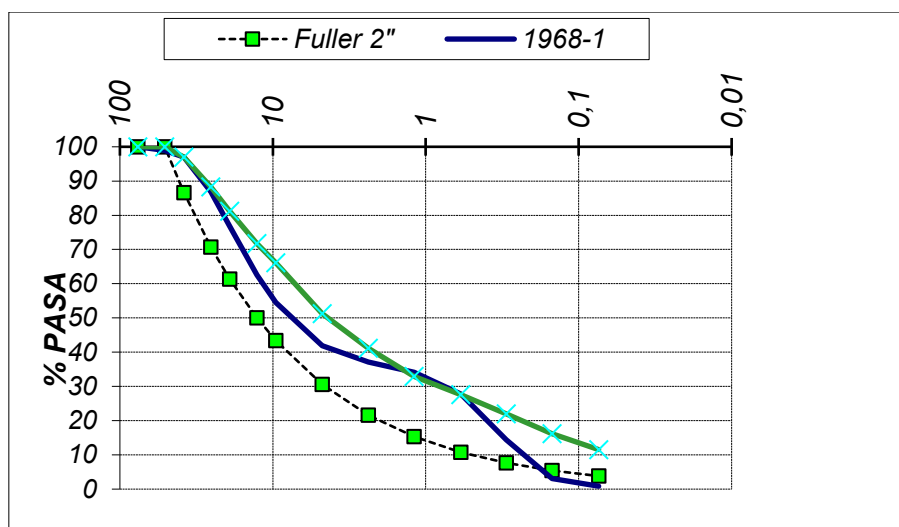


Figura 30. Distribución del tamaño de grano de las muestras alrededor del Fuller 2”

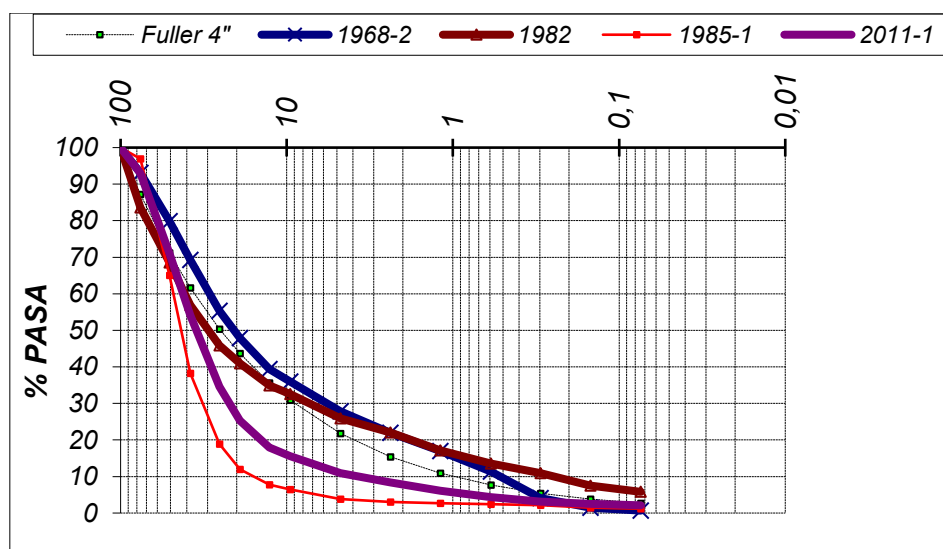


Figura 31. Distribución del tamaño de grano de las muestras alrededor del Fuller 4”.



Figura 33. Llanura aluvial del río San Juan con abundante material tipo gravas, sector de Bolombolo.
Fotografía: el autor.

La muestra 1985-1 retiene el 96 % de su peso en el tamiz No 4 (Figura 31), carece de finos y no se puede asemejar a un rango Fuller; por lo tanto, debe ser combinado con un material arenoso para poder obtener mortero o pasta en el momento de producir mezclas de hormigón. Cumple con los ensayos de Pasa 200, peso específico aparente, terrones de arcilla y partículas deleznable y tiene un bajo desgaste en la máquina de Los Ángeles.

5.1.3 Sector de San Pedro - Belmira

Estos depósitos están localizados en la parte nororiental del área de investigación y corresponden a varias terrazas aluviales localizadas en las márgenes del Río Chico, entre las poblaciones de San Pedro y Belmira (Figuras 16, 34). La muestra MMS 2011 tomada en cercanías a San Pedro, retiene el 89 % de su peso en el tamiz No 4, carece de finos y se aleja mucho del rango Fuller de 4" (Figura 31). Por lo tanto, debe ser combinada con un material arenoso para poder obtener mortero o pasta en el momento de producir mezclas de hormigón.



Figura 34. Aluvión en el río Chico, sector de Belmira con abundante material tipo grava gruesa.

Fotografía: el autor

5.1.4 Sector del Valle de Aburrá

Este sector está conformado por terrazas aluviales y demás depósitos asociados al Río Medellín y a la zona del Valle de Aburrá (Figura 16), en la cual se hace una extensiva explotación de áridos naturales, especialmente en su sector norte (Figuras 35, 36). En estos depósitos no se tomaron muestras para ensayos físicos y químicos debido a restricciones de las empresas. Los materiales de este sector corresponden a granos redondeados a subredondeados, su composición litológica es, en su mayor parte, basaltos, granitos y cuarcitas. Una parte importante del material empleado en la fabricación de hormigón y mezclas asfálticas del área de influencia de la ciudad de Medellín ha provenído de los depósitos de arena y grava de este sector. Aunque esto ahora está cambiando debido a los cambios de uso del suelo y a la mayor construcción de naves industriales y edificios para vivienda sobre estos sitios.



Figura 35. Perfil de una explotación de arena y grava en una terraza aluvial del río Medellín, sector del Valle de Aburrá, ciudad de Medellín.
Fotografía: el autor.



Figura 36. Operación extractiva de arenas y gravas en terrazas del río Medellín, sector Valle de Aburrá, Medellín.
Fuente: [Mincivil \(2024\)](#)

5.2 Depósitos no consolidados para arenas

Corresponden a varios depósitos aluviales, en el cauce de los ríos, en los cuales se han formado acumulaciones importantes, por su dimensión, de material de arenas y algunos se encuentran, actualmente, en explotación. Los resultados de los ensayos físicos se presentan en la [tabla 32](#) y las especificaciones requeridas, en las [tablas 11 y 12](#). Estas arenas presentan buenos resultados en el ensayo del material pasante tamiz número 200, pues cuatro muestras están por debajo del límite permitido que es menor que 5% para áridos finos. Sólo la muestra 1986-3 tiene un valor superior. Todas las muestras están al límite o cumplen el requerimiento de peso específico que para áridos finos debe ser superior a 2,55 g/cm³. Sin embargo, todas las muestras presentan valores superiores y muy superiores al límite permitido que es 0,5% y necesitarían un beneficio para poder utilizarlas como árido fino en hormigón o mampostería.

Tabla 28. Resultados de los ensayos físicos de muestras de arenas en depósitos no consolidados

Muestra MMS	Unidad Roca	Árido	Pasa 200 (%)	Peso específico SSS (g/cm ³)	Partículas livianas (%)
MMS 1969	Aluvión Reciente	Arena mortero	1,04	2,63	2,2
MMS 1983-2	Aluvión Reciente	Arena mortero	3,58	2,54	1,4
MMS 1986-1	Aluvión Reciente	Arena mortero	1,69	2,62	0,9
MMS 1986-2	Aluvión Reciente	Arena mortero	3,3	2,58	5,6
MMS 1986-3	Aluvión Reciente	Arena mortero	10,44	2,54	14,7

5.2.1 Sector de Santa Fe de Antioquia - Sopetrán

Corresponde a cuerpos de arenas interestratificados con las gravas de los aluviones recientes y terrazas del área del Río Cauca ([Figura 16](#)), con sus afluentes las quebradas La Sucia y La Sopetrana y los ríos Aurrá y Tonusco. Este material se localiza, principalmente, en el material del Cauce del Río Cauca y en las terrazas del sector de Colfrutas ([Figura 37](#)). La arena fina identificada como MMS 1969 presenta un contenido de partículas livianas superior al 0,50%, requisito de la norma NTC 2240 estipulado para las arenas de mortero lo cual requiere un procesamiento especial para conseguir su eliminación y poder ser empleadas en mampostería. La

gradación de estas arenas se encuentra fuera de la especificación de la NTC 2240 (Figura 38). Sin embargo, las muestras 1983-2, 1986-2 y 1969 presentan una gran similitud en su distribución granulométrica. La muestra 1986-1 tiene una distribución muy cercana a la línea del requerimiento de la norma NTC 2240. La muestra 1986-3 está bastante alejada de las especificaciones y requiere un beneficio mayor para ser utilizada como árido fino.



Figura 37. Barras laterales de arena en el río Cauca, sector de Santa Fe de Antioquia. Fotografía: el autor.

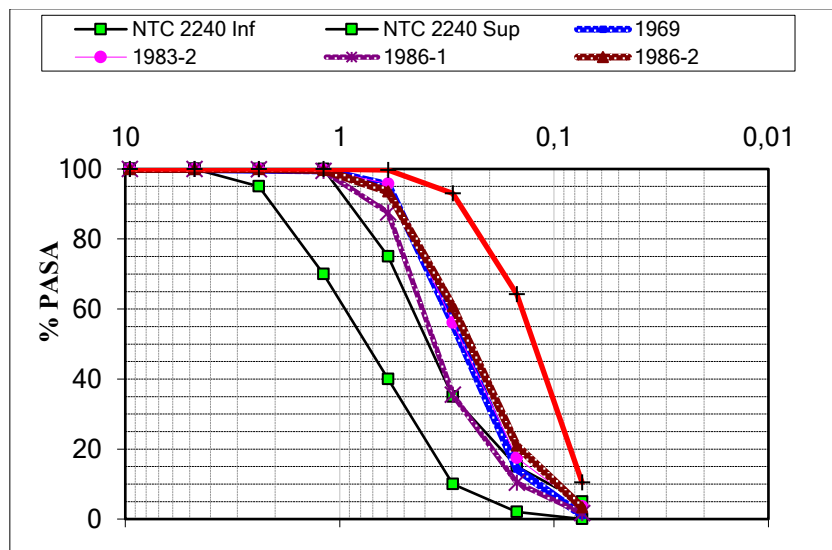


Figura 38. Distribución del tamaño de grano de muestras en depósitos no consolidados con arena.

Muestras MMS 1969: Río Cauca-Sector de Colfrutas; MMS 1983-2: Río San Juan desembocadura al Río Cauca; MMS 1986-1-2-3: Río Cauca, Bolombolo.

5.2.2 Sector de Bolombolo

Estos depósitos se localizan en los bordes del cauce del río Cauca, principalmente en los sectores, al norte y sur, próximos a la población de Bolombolo (Figura 16). En estos lugares se han desarrollado depósitos de arenas finas a gruesas. El aluvión del río Cauca, localizado a cinco kilómetros al norte de Bolombolo (Figura 39) y el aluvión del río San Juan, ubicado a dos kilómetros al sur de esta población (Figura 40) constituyen una importante fuente de arena para mortero utilizada en la industria de la construcción en el área metropolitana de Medellín.



Figura 39. Aluvión del río Cauca, altura de Bolombolo, con abundante arena fina empleada en mampostería.
Fotografía: el autor

Las arenas finas identificadas como MMS 1983–2, MMS 1986–1, MMS 1986–2 y MMS 1986–3 presentaron contenidos de partículas livianas superior al 0,50 %, requisito de la norma NTC 2240 estipulado para las arenas de mortero, lo cual requiere un procesamiento especial para conseguir su eliminación y poder ser empleadas en mampostería. La gradación de estas arenas se encuentra por fuera del requerimiento de la NTC 2240 (Figura 26).



Figura 40. Extracción de arena fina utilizada en mampostería. Aluvión del río Cauca, sector de Bolombolo.
Fotografía: el autor.

5.3 Rocas estratificadas con arenas y gravas

Corresponden a rocas sedimentarias, que en los casos en que presenta meteorización y liberación de sus partículas, podrían ser utilizadas como fuentes de áridos sin un proceso extensivo de beneficio del material. Los resultados de los ensayos físicos y químicos obtenidos en los depósitos estratificados de arenas y gravas se presentan en las tablas 31 y 32. A continuación se describen los áridos caracterizados en las unidades litoestratigráficas representadas gráficamente en la [Figura 41](#). Estas unidades y sus respectivas muestras de roca pueden verse en detalle en el proyecto de ArcGis ([Anexo 1](#)).

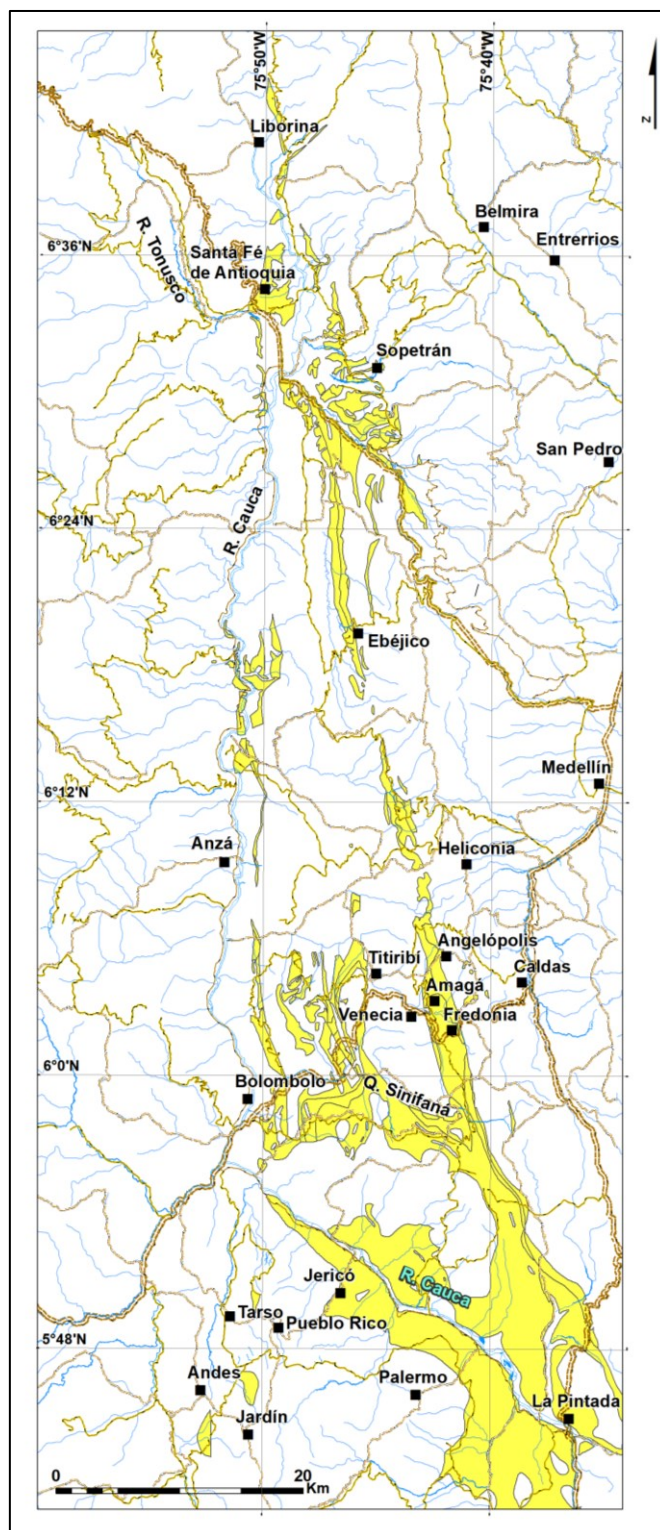


Figura 41. Distribución de depósitos potenciales para arenas y gravas en rocas estratificadas (zonas amarillas). Ríos: línea azul; vías: líneas sencilla y doble naranja. Fuente: Modificado de Calle et al. (1980); Mejía et al. (1983a); Mejía et al. (1983b).

5.3.1 Formación Amagá

La Formación Amagá corresponde a una intercalación de areniscas y arcillolitas con presencia de capas de carbón (Figuras 42, 43). Los ensayos hechos en los estratos de areniscas cuarzosas de la Formación Amagá presentan los siguientes resultados (Tabla 33, Figuras 44, 45, 46, 47, 48 y 49) comparados con los resultados obtenidos en muestras de depósitos no consolidados. Las muestras de la Formación Amagá presentan valores del material que pasa el tamiz número 200 bastante superior al permitido, - menor que 5% para árido fino y menor que 1,0% para los áridos gruesos y un peso específico ligeramente por debajo de $2,55 \text{ g/cm}^3$ - límite mínimo de la norma. Una muestra cumple con la absorción, mientras que la otra está por encima del límite mínimo que es 3% para los áridos gruesos. Los resultados del desgaste en la máquina de Los Ángeles indican que la muestra de la Formación Amagá entra en la NTC 174 pero no cumple para INV 2018. Los resultados del ensayo de Terrones de arcilla y partículas deleznablez indican que la muestra 2007-1 con 0,8% cumple como árido fino de ambas normas - menor que 3% para NTC 174 y menor que 1% para INVIAS E221, mientras que la muestra 2007-3 tiene un 13%, ubicándose por fuera de las especificaciones de cualquiera de las normas. La granulometría se aleja de la norma NTC 2240 (Figura 50).



Figura 42. Estratos de arenisca cuarzosa y limolitas en la Carretera Sopetrán – Santa Fe de Antioquia.

Fotografía: el autor



Figura 43. Exposición de la Formación Amagá con estratos de arenisca y limolitas en el sector de Sopetrán.
Fotografía: el autor.

Tabla 29. Resultados de los ensayos físicos de rocas estratificadas con arena y grava.

Muestra MMS	Unidad de Roca	de	Árido ducto	Pro-	Pasa 200 (%)	Peso esp. aparente (g/cm ³)	Absorción (%)	Desgaste Los Ángeles (%)	Terrones de Arcilla y Partículas deleznales (%)
1982	Combia, Fm.		Fuller 4" (1)		5,81	2,3	8,01	30,3	1,80
2007-1	Amagá, Miembro inferior	F.,	Fuller de 2" (2)		11,54	2,53	1,87	43,6	0,8
2007-3	Amagá, Miembro inferior	F.	Arena mortero		15,26	2,51	5,6	----	13,2

Ver [Tabla 6](#) para consultar las especificaciones requeridas. Mejorar para Fuller de 4"; (2) Mejorar para Fuller de 2".

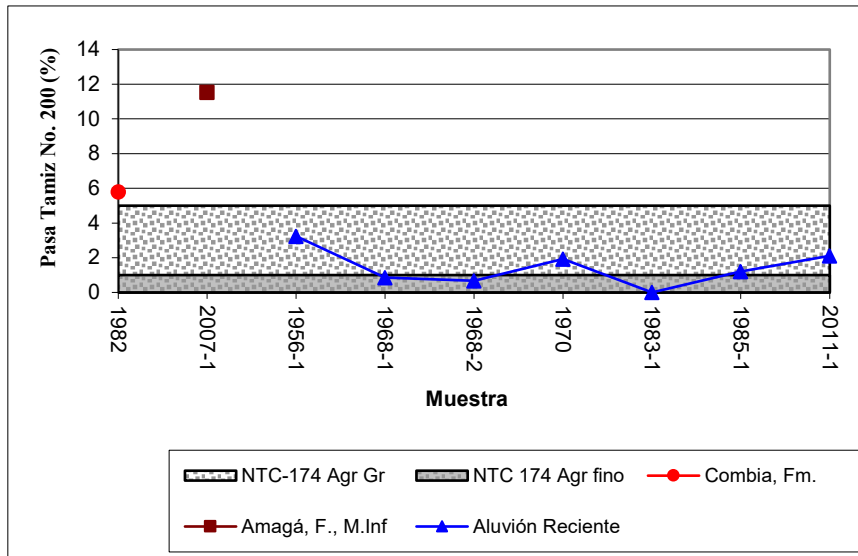


Figura 44. Localización de los resultados del ensayo pasa tamiz No. 200 en depósitos potenciales de arenas y gravas de acuerdo a la norma NTC 174 para áridos gruesos y finos.

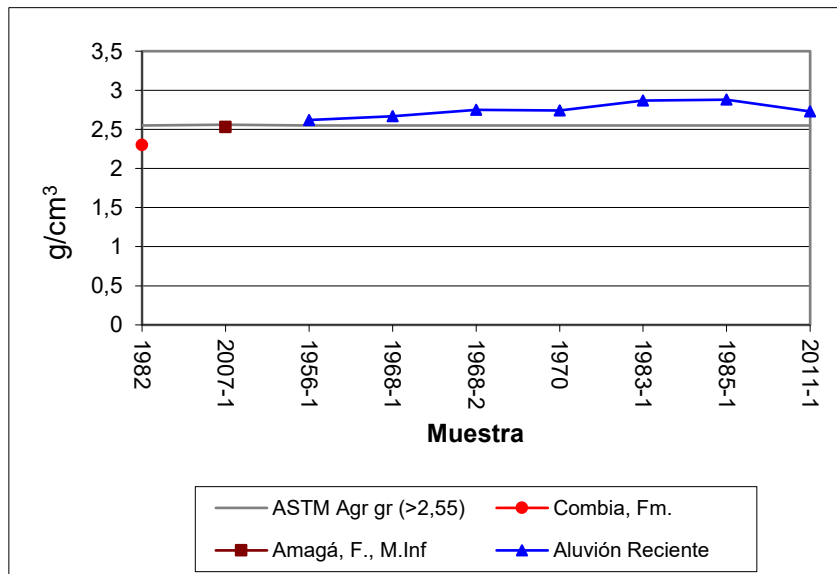


Figura 45. Localización del peso específico aparente de arenas y gravas de acuerdo a ASTM para áridos gruesos.

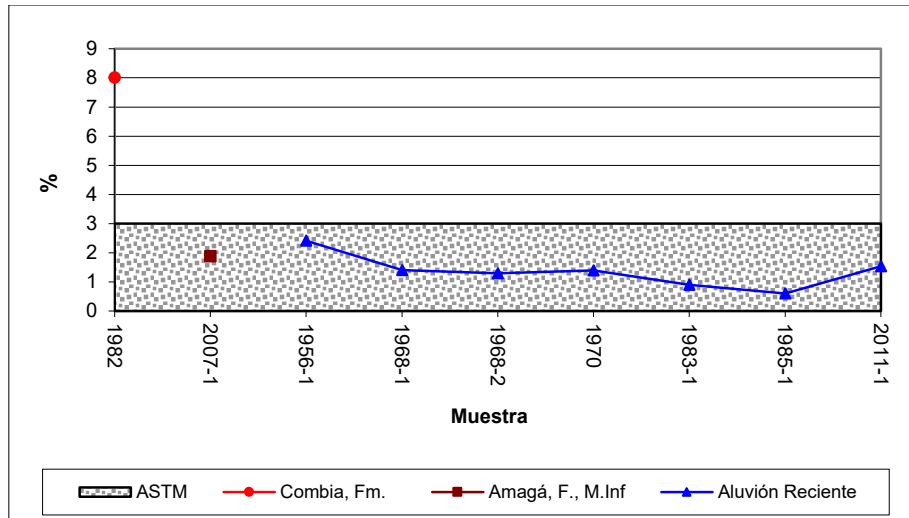


Figura 46. Localización de los datos de absorción en unidades potenciales para arenas y gravas de acuerdo a la especificación para áridos gruesos.

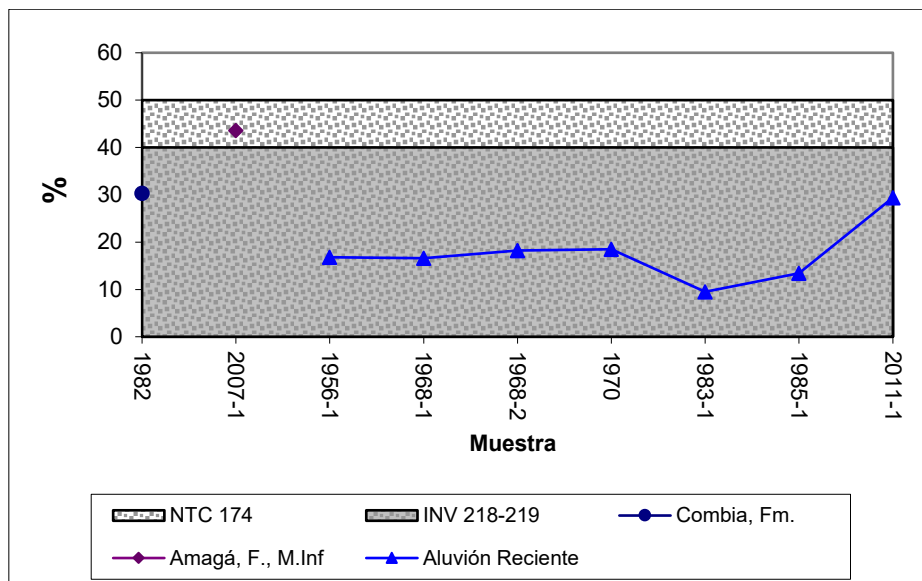


Figura 47. Localización de los datos de desgaste en la máquina de Los Ángeles en unidades potenciales para muestras de gravas las formaciones Combia y Amagá, y su comparación con los depósitos no consolidados.

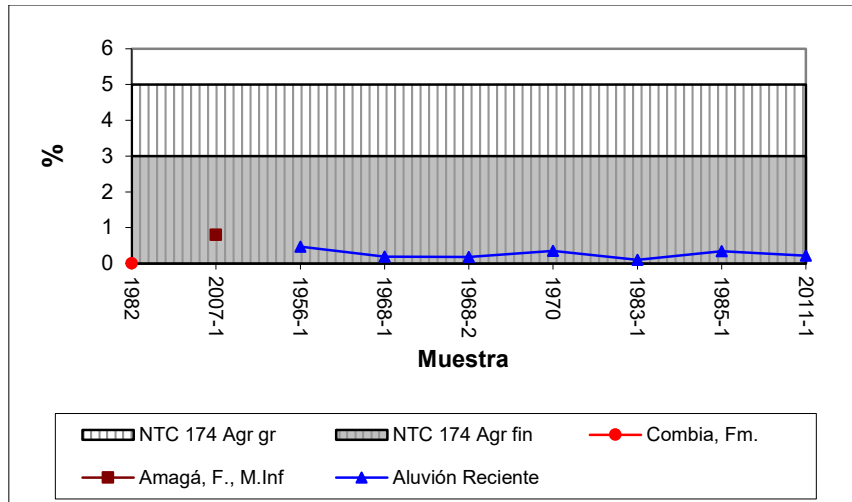


Figura 48. Localización de los datos de terrones de arcilla y partículas deleznable en unidades potenciales para arenas y gravas de acuerdo con las especificaciones de NTC 174 para la elaboración de hormigón.

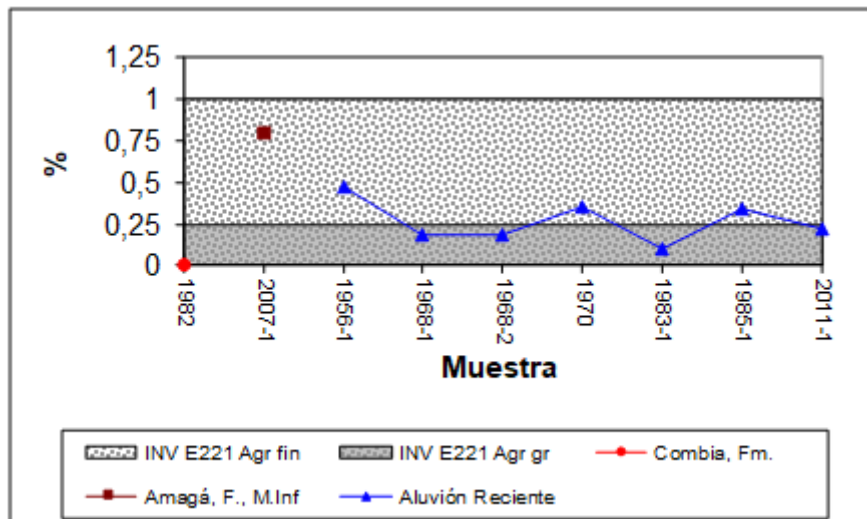


Figura 49. Localización de los datos de terrones de arcilla y partículas deleznable en unidades potenciales para arenas y gravas de acuerdo con las especificaciones de INV E221 utilizadas en carreteras.

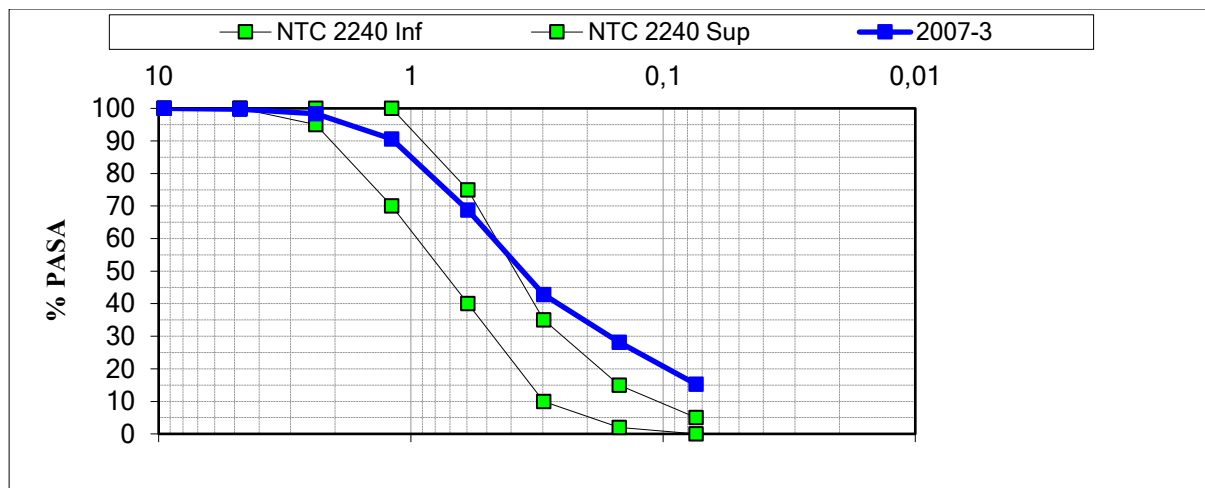


Figura 50. Distribución granulométrica de la muestra 2007-3 de la Formación Amagá.

5.3.2 Formación Combia (Miembro Sedimentario)

La Tabla 33 y las figuras 44, 45, 46, 47, 48 y 49 permiten ver los resultados de los ensayos hechos a la muestra MMS 1982 de la Formación Combia, y su comparación con los resultados obtenidos en muestras de la Formación Amagá y los depósitos no consolidados. La muestra de la Formación Combia presenta un valor del material que pasa el tamiz número 200 de 5,81% que no cumple con el límite máximo que es 5% para los áridos finos. El peso específico no cumple con el requerimiento que debe ser menor que 2,55 g/cm³, la absorción es 8,01% sin cumplir pues el máximo permitido es 3%. El desgaste de la máquina de Los Ángeles es 30%, valor que cumple pues está por debajo de los requerimientos de NTC e INVIAS, 50% y 40%, respectivamente. El potencial para la reacción álcali-sílice dio un resultado negativo (Tabla 34).

Tabla 30. Resultados del ensayo álcali-sílice en rocas estratificadas de la Formación Combia.

Muestra	Álcali – Sílice		
	Concentración Sílice (Sc) (mmol/l)	Reducción de alcalinidad (Rc) (mmol/l)	Potencialidad
1982	40	559	<u>No</u>

5.4 Macizos rocosos para arena y grava

Son acumulaciones de arenas que se han formado en el nivel V del perfil de meteorización, correspondiente al nivel llamado “Fuerte meteorización”, en rocas ígneas del tipo granito o metamórficas de origen ígneo. Estos depósitos se presentan cerca de las poblaciones de Belmira, San Pedro y Amagá (Figura 51), en unidades litológicas denominadas Stock de Amagá, Gneis de la Miel, Batolito Antioqueño y Stock de Altavista. Estas unidades y sus respectivas muestras de roca pueden verse en detalle en el proyecto de ArcGis (Anexo 1).

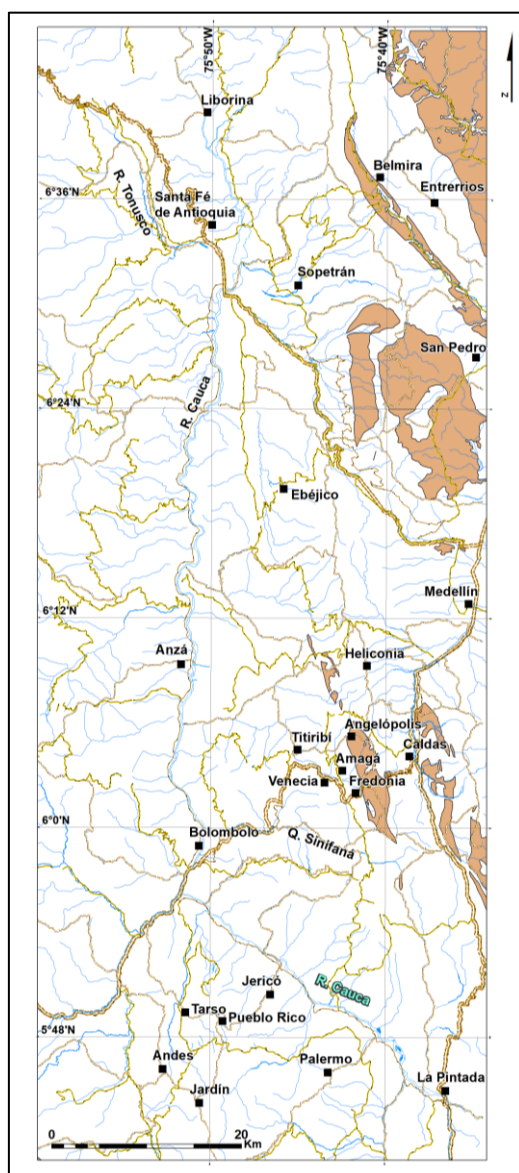


Figura 51. Distribución de las fuentes de arena y grava en macizos rocosos (zonas marrones). Ríos: línea azul; vías: doble línea discontinua.

Fuente: Modificado de Calle et al. (1980); Mejía et al. (1983a); Mejía et al. (1983b).

5.4.1 Stock de Amagá

El Stock de Amagá es un cuerpo de roca ígnea, tipo granito en sentido industrial, localizado al Este de la población de Amagá (Figura 51). La roca predominante es maciza, granular a porfídica. La descomposición de los feldespatos en arcillas deja libre los cristales de cuarzo que son el mayor componente de las arenas que se aprovechan en estos depósitos (Figuras 52, 53).



Figura 52. Cantera de arena en rocas del Stock de Amagá con alta meteorización.
Fotografía: el autor.



Figura 53. Perfil del Stock de Amagá con abundante meteorización que ha creado un perfil rico en arena. Carretera Medellín – Amagá.
Fotografía: el autor

La muestra MMS 1971 tiene predominio de arena fina, y sólo el 21 % se retiene en el tamiz No 4; por esta razón se aleja mucho del Fuller de 1" (Figura 54). Los resultados de los ensayos físicos (Tabla 35) muestran que el porcentaje de material que pasa el tamiz No 200 es inferior al 5 % cumpliendo con el requisito especificado. El contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales es de 2,74%, aceptable según el requerimiento de la NTC 174 (menor que 3% para áridos finos). El contenido de partículas livianas es de 0,8%, el cual está por encima de la especificación de la norma de INVIAS que es menor que 0,5% para árido fino (Tabla 6).

Tabla 31. Resultados de los ensayos físicos en macizos rocosos.

Muestra	Unidad Roca	Árido Producto	Pasa 200 (%)	Peso Esp. aparente (g/cm ³)	Absorción (%)	Terrones Arcilla y Partículas deleznales(%)	Partículas livianas (%)
Depósitos en macizos rocosos							
1971	Amagá, Stock de	Fuller de 1"	<u>2,49</u>	2,56	3,65	2,74	<u>0,8</u>
1999	Antioqueño, Batolito	Arena de hormigón	9,51	2,38	8,2	<u>1,2</u>	2,6
2012	Antioqueño, Batolito	Arena mortero	27,4	2,3	11,76	5,8	3,8
2002	Miel, Neis de la	Arena mortero	14,14	2,48	4,8	6,4	1,1

2,62 Valor aceptable; 10,44 Valor no aceptable; Ver Tablas 6 para consultar las especificaciones requeridas.

5.4.2 Gneis de la Miel

Esta unidad se localiza en cercanías del municipio de Caldas (Figura 51). Es un cuerpo de rocas graníticas, en el sentido industrial. La muestra MMS 2002 muestra una distribución granulométrica ajustada desde la parte gruesa a la intermedia (Figura 54) aunque contiene una parte importante de material pasa tamiz 200. Los resultados de los ensayos físicos (Tabla 35) muestran que esta roca presenta contenidos de partículas livianas superior al 0,5 %, requisito de la norma NTC 2240 estipulado para las arenas de mortero. Además, la cantidad de terrones de arcillas y partículas deleznales es superior a 3%, límite mínimo de NTC 2240.

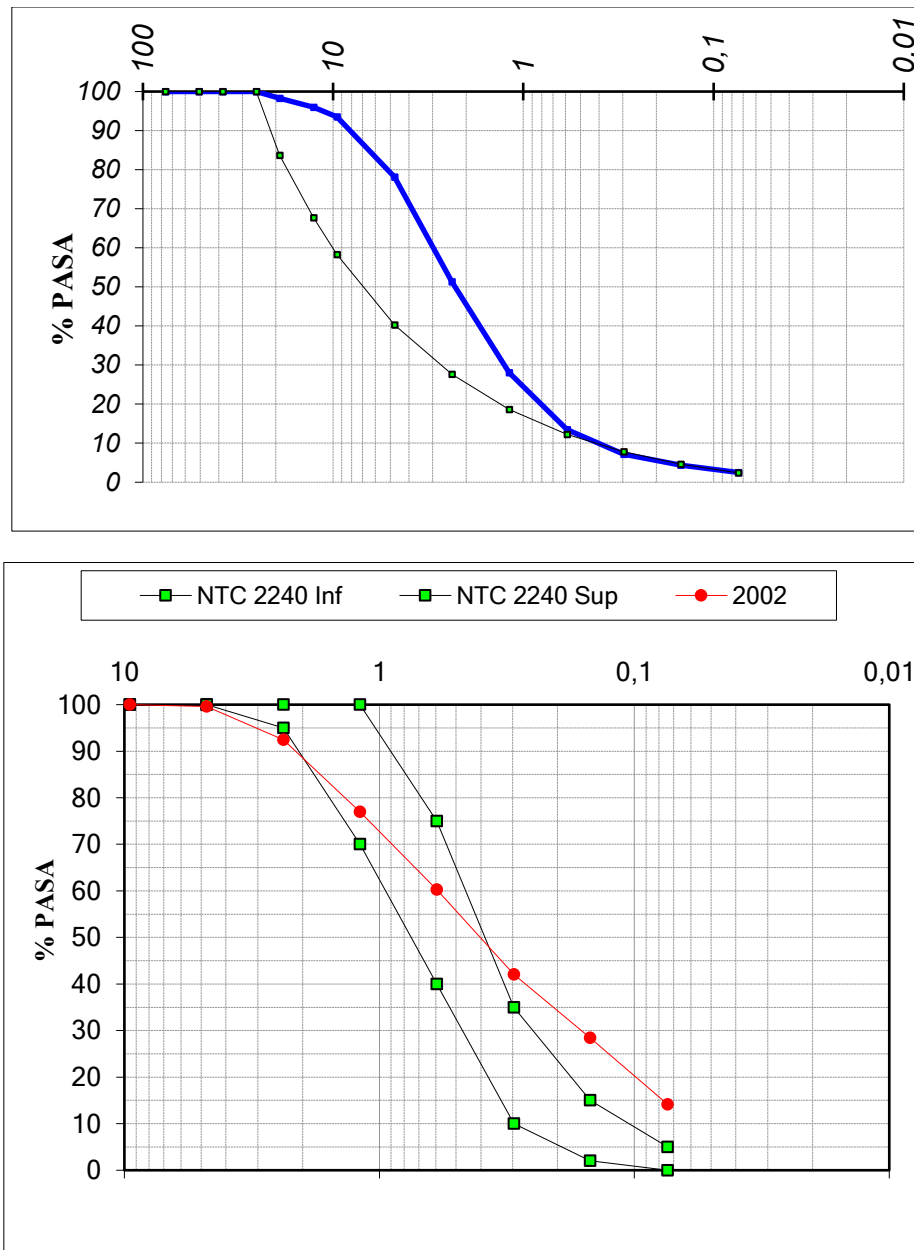


Figura 54. Distribución del tamaño de grano de acuerdo al rango Fuller de 1" de material arenoso proveniente del Stock de Amagá, muestra MMS 1971 (arriba) y del Gneis de la Miel, muestra 2002 (abajo)

5.4.3 Batolito Antioqueño

Unidad expuesta en la parte nororiental del área de investigación en cercanías de los municipios de Belmira y San Pedro (Figura 51). La roca predominante es un “granito”, en sentido industrial. La composición petrográfica corresponde a una roca que varía entre tonalita y granodiorita, en ocasiones gabro. El Batolito Antioqueño presenta los siguientes cuerpos relacionados:

- Batolito de Ovejas. Localizado entre las poblaciones de Bello y Sopetrán.
- Stock de Belmira. Este cuerpo aflora en la carretera San Pedro-Belmira. Su característica principal es la orientación paralela a subparalela de cristales de hornblenda.

La muestra MMS 1999 fue tomada en la vereda Yarumal, vía Santa Elena – Rio-negro. La muestra posee una distribución de tamaños muy irregular. La curva granulométrica está distribuida en varios tamices (Figura 55). El porcentaje de material que pasa el tamiz No 200 es superior al 5 % y tiene un contenido de partículas livianas mayor del permitido.

La muestra 2012, correspondiente a una arena fina, presenta contenidos de partículas livianas superior al 0,50 %, requisito de la norma NTC 2240 estipulado para las arenas de mortero.

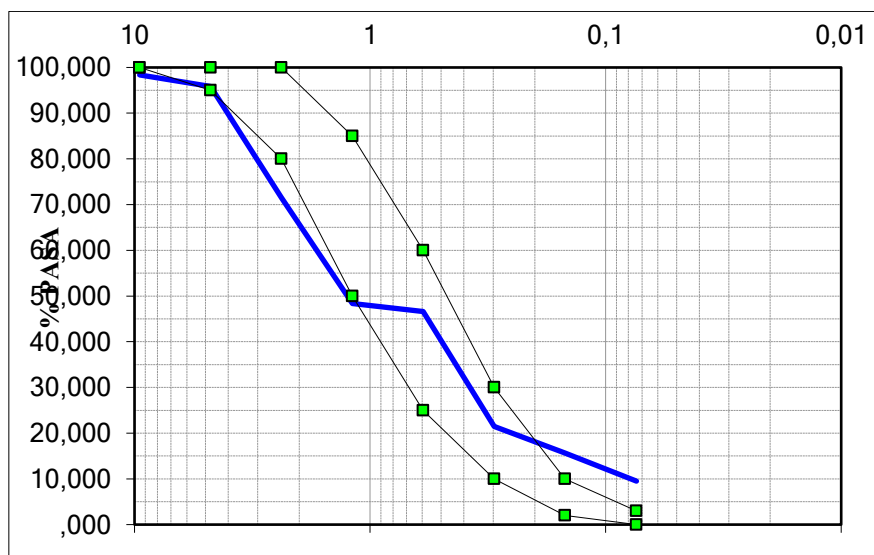


Figura 55. Distribución del tamaño de grano de material arenoso proveniente del Batolito Antioqueño (muestra MMS 1999) de acuerdo al rango de control NTC 174 (líneas verdes).

5.4.4 Stock de Altavista

El Stock de Altavista es una unidad de roca ígnea intrusiva. Los tipos de roca varían desde porfídicas con matriz afanítica y composición andesítica a diorita, tonalita y gabro con buenas exposiciones por los cortes en construcción de las carreteras (Figura 56).

Las rocas del Stock de Altavista han formado depósitos de arena por procesos de meteorización explotados, principalmente, en el área urbana dentro de la ciudad

de Medellín. En este trabajo no se logró tomar muestras de estos depósitos por motivos de seguridad.



Figura 56. Exposición rocosa del Stock de Altavista en cercanías a Medellín.
Fotografía: el autor.

5.5 Rocas ígneas para áridos de machaqueo

En este capítulo se presenta la valoración de la calidad física y química de las unidades de roca con potencialidad para ser utilizadas como fuente de áridos de machaqueo basándose en la calidad de las muestras y observaciones de campo, unido a las consideraciones a nivel regional de las unidades y a su distribución litoestratigráfica. Estas unidades y sus respectivas muestras de roca pueden verse en detalle en el proyecto de ArcGis ([Anexo 1](#)).

La descripción de cada unidad de roca tiene en cuenta los conceptos de perfil de meteorización de un macizo rocoso ([Tabla 19](#)), el grado de fracturación de un macizo ([Tabla 20](#)), el grado de resistencia de una roca ([Tabla 21](#)) y la textura o grado de rugosidad o irregularidad de la superficie de una partícula de agregado ([Tabla 22](#)). El color de la roca está dado de acuerdo a la carta de colores de [Geological Society of America \(1984\)](#).

5.5.1 Material Satisfactorio – Nocivo AS (Álcali – Sílice)

Materiales que corresponden a rocas con calidad física satisfactoria y calidad química potencialmente nociva debido, principalmente, a la presencia de sílice que puede reaccionar con los álcalis del cemento.

Estos materiales se encuentran en las unidades denominadas Rocas Hipoabisales Porfídicas, las cuales son cuerpos de rocas porfídicas, de composición variable entre andesita y dacita que constituyen geoformas sobresalientes en las poblaciones de Titiribí y Angelópolis, al norte del área de investigación, y La Pintada-Valparaíso-Caramanta al sur (Figura 57). Algunos de estos cuerpos se extienden hacia el sur del departamento de Antioquia, a lo largo de la depresión del Cauca. Las unidades de roca incluidas en el conjunto denominado Rocas Hipoabisales Porfídicas son andesitas porfídicas micáceas-hornbléndicas con calidad química nociva por la presencia importante de partículas livianas tipo micas.

Los Pórfidos andesíticos micáceos son cuerpos constituidos por una pasta muy fina, con fenocristales de plagioclasa, biotita abundante y escasos cristales de hornblenda. La principal característica de los Pórfidos Andesíticos Hornbléndicos es su expresión geomorfológica que sobresale como cuerpos intrusivos en rocas sedimentarias (Figura 58).

Los afloramientos rocosos muestreados en la unidad de roca “Rocas Hipoabisales Porfídicas” e identificados como MMS 1977 (carretera Amagá – Titiribí, al occidente del Sitio El Líbano) y MMS 1981 (carretera Bolombolo – Venecia), ubicados en el talud de las vías, presentan unas dimensiones de 80 m de largo y 12 m de alto, y 30 m de largo por 5 m de alto, respectivamente, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 4 m (Figura 59). En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento y su grado de fracturación es moderadamente fracturado. Las rocas corresponden a andesita hornbléndica porfídica (Figura 60) que tienen un color general gris verde oscuro a gris medio claro (5G 4/1 a N6) (Geological Society of America, 1984), la resistencia es fuerte y la textura de la superficie de las rocas es suave o cristalina. La roca es sana y no presenta alteración visible de minerales. Los resultados de los ensayos químicos y físicos realizados a estas muestras se presentan en las tablas 36 y 37.

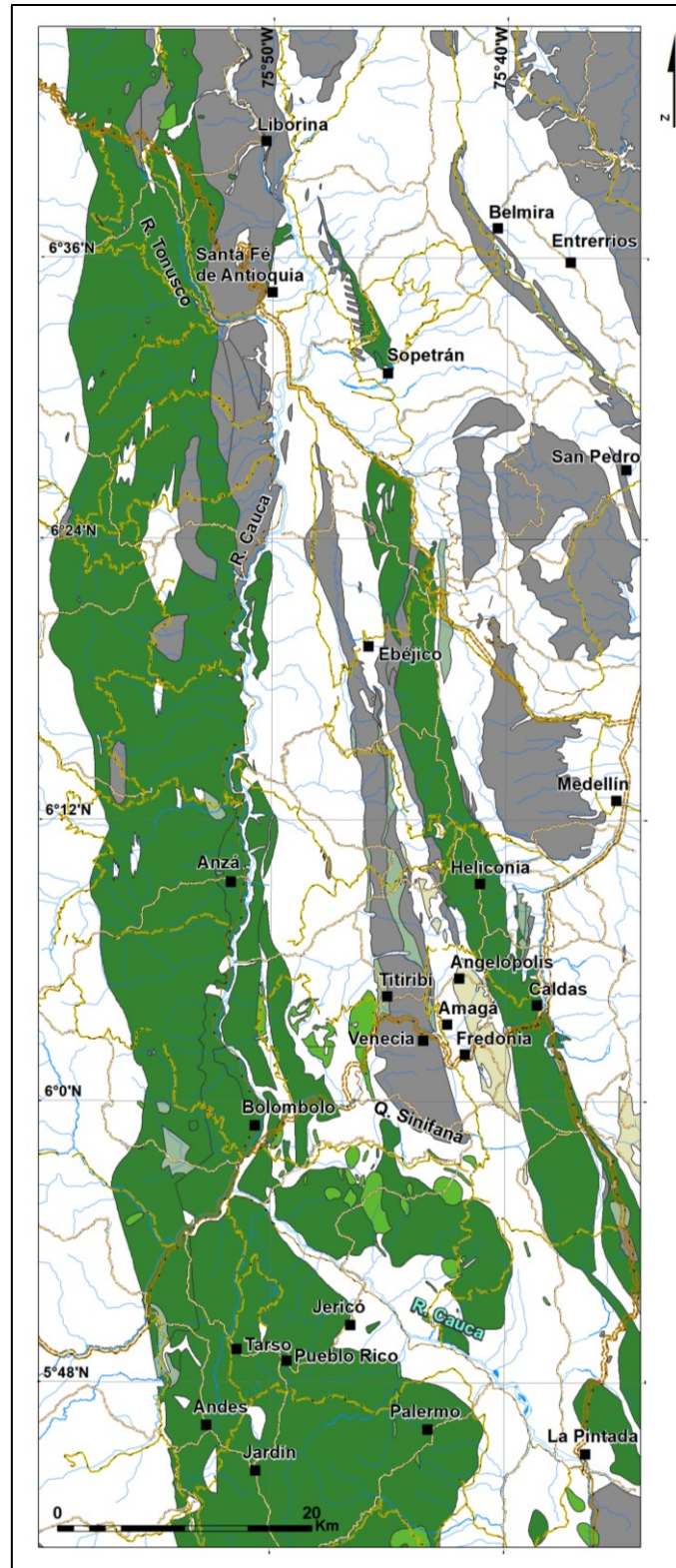


Figura 57. Distribución de rocas ígneas, volcánicas (verde oscuro), hipoabisales (verde claro) e intrusivas (gris). Río: línea azul; vía: línea discontinua naranja.
Fuente: Modificado de Calle et al. (1980); Mejía et al. (1983a); Mejía et al. (1983b).



Figura 58. Expresión morfológica del cuerpo porfídico, Cerro Tusa (geoforma triangular) y rocas estratificadas de la Formación Amagá.
Fotografía: el autor.

Tabla 32. Resultados de ensayos físicos realizados a muestras de rocas ígneas

Muestra	Unidad de Roca	Peso específico aparente (g/cm ³)	Absorción (%)	Desgaste. Máquina de Los Ángeles (%)	Partículas Livianas (%)
MMS 1953	Romeral, Gabro de	2,961	0,03	8,6	
MMS 1954	Quebradagrande, Complejo	2,888	0	10,7	
MMS 1957	Heliconia, Diorita de	2,847	0,98	32,3	
MMS 1958	Pueblito, Diorita de	3,021	0,09	6,3	5,45
MMS 1959	Ultramáfico (Jus)	2,728	0,5	20,6	
MMS 1966	Sabanalarga, Batolito	2,815	0,4	21,3	
MMS 1967	Quebradagrande, Complejo	2,851	0,2	16,3	
MMS 1972	Amagá, Stock de	2,642	1,31	56,6	1,6
MMS 1976	Pueblito, Diorita de	3,002	0	10,1	4,45
MMS 1977	Andesita hornbléndica, Pórfido	2,654	0,98	15,6	
MMS 1979	Barroso, Basaltos de	2,934	0,2	18	
MMS 1981	Hb Porfídica, Andesita	2,733	2,35	12,8	
MMS 1987	Barroso, Basaltos de	3,038	0,5	9	
MMS 1989	Hispania, Gabro de	2,968	0,2	24,3	
MMS 1991	Combia, Formación	2,699	1,49	14,6	
MMS 1992	Combia, Formación	2,693	0,14	17,7	
MMS 1993	Cambumbia, Stock	2,8	0,31	13,9	3,95
MMS 2004	Medellín, Dunitas de	2,762	0,2	14,7	
MMS 2013	Antioqueño, Batolito	2,68	0,6	31,7	2,3
MMS 2015	Altavista, Stock de	2,82	0,3	11	
MMS 2016	Antioqueño, Batolito	2,682	0,4	22,6	1,9

2,62 Valor aceptable. 10,44 Valor no aceptable. Ver [Tabla 6](#) para consultar las especificaciones requeridas

Tabla 33. Resultados de los análisis de reactividad Álcali – Sílice realizados a muestras de roca ígnea.

Muestra	Unidad de Roca	Álcali – sílice		Potencialidad
		Concentración Sílice (Sc) (mmol/l)	Reducción de alcalinidad (Rc) (mmol/l)	
1954	Quebradagrande, Complejo	84,2	72	Si
1959	Ultramáfico			
1967	Quebradagrande, Complejo	78,8	181	<u>No</u>
1977	Andesita porfídica hornbléndica	82,6	75	Si
1979	Barroso, Basaltos	86,4	-	?
1981	Andesita porfídica hornbléndica	77,8	96	<u>No</u>
1987	Barroso, Basaltos	33	40,5	Si
1989	Hispania, Gabro			
1991	Quebradagrande, Complejo	138,8	106	Si
1992	Quebradagrande, Complejo	115,2	145,5	<u>No</u>
2004	Medellín, Dunitas de			

Ver [Tabla 6](#) para consultar las especificaciones requeridas



Figura 59. Exposición de tobas y andesitas porfídicas. Carretera Jericó – La Pintada. Fotografía: el autor.



Figura 60. Muestra de andesita hornbléndica porfídica.
Fotografía: el autor.

Las muestras MMS 1977 y MMS 1981 presentan buenos resultados a los ensayos físicos con aceptables valores de absorción y peso específico aparente y un bajo desgaste en la Máquina de los Ángeles. El ensayo álcali – sílice dio positivo para la muestra MMS 1977 y negativo para la muestra MMS 1981. En general, las andesitas son rocas con potencialidad de reacción álcali – sílice.

5.5.2 Material Aceptable - Nocivo AS (Álcali - Sílice)

Estos materiales corresponden a rocas con calidad física aceptable y calidad química nociva principalmente por la presencia de sílice que puede reaccionar con los álcalis del cemento. Estos materiales se encuentran en las unidades rocosas ígneas (Figura 57) denominadas Basaltos de Barroso, Complejo Quebradagrande y Formación Combia.

Los Basaltos de Barrosos corresponden a lavas de basaltos toleíticos, sills y diques doleríticos (diabasas), esporádicos niveles de tobas básicas y localmente, picritas. Localmente se presentan secuencias estratificadas de tobas básicas, brechas volcánicas y delgados horizontes sedimentarios. El Complejo Quebradagrande está constituido por un conjunto de basaltos, andesitas, brechas, aglomerados y areniscas conglomeráticas. Se presentan también intervalos espesos de milonitas con horizontes delgados de calizas y chert. La Formación Combia está compuesta por un

conjunto de estratos esencialmente volcánicos y otro esencialmente de conglomerados.

Los afloramientos rocosos muestreados en la unidad de roca “Basaltos del Barroso” e identificados como MMS 1979 (Carretera Amagá - Bolombolo, Sector Líbano - Q. Sinifaná) y 1987 (Carretera Bolombolo-Hispania, km 8 desde Peñalisa), ubicados en el talud de las carreteras, presentan unas dimensiones de 100 m de largo y 15 m de alto, y 200 m de largo por 8 m de alto, respectivamente, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 15 y 8 m (Figura 61). En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento y su grado de fracturación es Moderadamente fracturado y Muy fracturado, respectivamente. Las rocas son volcánicas, tipo basaltos (Figura 62). Color general gris verde grisáceo y gris verdoso (5G 5/2 y 5GY 6/1). La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es cristalina a rugosa. La roca presenta ligera alteración a minerales de arcilla. .



Figura 61. Andesitas y basaltos de la unidad Basaltos de Barroso. Carretera Santa Fe de Antioquia – Buriticá.
Fotografía: el autor



Figura 62. Muestra de roca de Basaltos de Barroso.
Fotografía: el autor

Los afloramientos rocosos muestreados en la unidad Formación Combia ([Figura 63](#)) e identificados como muestra 1991 (Carretera Pueblo Rico – Jericó) y 1992 (Carretera Jericó – Puente Iglesias), ubicadas en una cantera y en un talud de la vía, presentan unas dimensiones de 50 m de largo y 9 m de alto, y 50 m de largo y 4 m de alto, respectivamente, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 6 y 4 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente en el sitio de la muestra 1954 es la fracturación y el diaclasamiento. El grado de fracturación es Moderadamente fracturado. Las rocas son volcánicas, tipo tobas soldadas y basaltos, materiales que han sido empleados en la construcción de edificaciones ([Figura 64](#)). El color de la roca es gris oscuro (N3) ([Geological Society of America, 1984](#)). La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es panal o rugosa. La roca presenta ligera alteración a minerales de arcilla. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos tipo vidrio volcánico.



Figura 63. Expresión morfológica de la Formación Combia en la población de Jardín.
Fotografía: el autor



Figura 64. Iglesia de la localidad de Jardín construida totalmente con tobas de la Formación Combia.
Fotografía: el autor

De acuerdo a los ensayos hechos en esta unidad (Tabla 36), las rocas de los Basaltos de Barroso tienen un peso específico de 2,934 y 3,038 g/cm³, cercano y ligeramente por encima del límite superior empleado por las empresas (2,95 g/cm³). Las rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande (Figura 65) son generalmente basaltos (Figura 66) y tienen un peso específico aparente menor que las del Barroso, 2,888 y 2,851 g/cm³. Las rocas volcánicas de la Formación Combia presentan valores de 2,699 y 2,693 g/cm³, los cuales son valores intermedios al rango permitido para áridos gruesos (2,3 – 2,95 g/cm³). Los valores de absorción, que de acuerdo a la ASTM deben ser menores de 3%, son muy bajos para los tres tipos de roca. Los valores del desgaste en la Máquina de Los Ángeles deben ser menores de 50% según la NTC 174 y menores que 40% según INVIAS. Los valores obtenidos en las rocas volcánicas de las tres unidades de roca son menores que 18%, con lo cual satisfacen claramente la especificación requerida.



Figura 65. Excavaciones en trabajos de construcción de carretera en rocas del Complejo Quebradagrande, vía Medellín – Santa Fe de Antioquia.
Fotografía: el autor

El ensayo álcali – sílice hecho en las seis muestras dio positivo para una muestra de cada unidad (Tabla 37), con lo cual se puede decir, de manera preliminar, que las rocas de estas unidades de roca son potencialmente reactivas con los álcalis del cemento.



Figura 66. Muestra de basalto en el Complejo Quebradagrande.
Fotografía: el autor

5.5.3 Material Aceptable - Nocivo PL (Partículas Livianas)

Estos materiales corresponden a rocas con calidad física aceptable y calidad química nociva principalmente por la presencia de partículas livianas y se encuentran en las unidades rocosas ígneas (Figura 57) denominadas Batolito Antioqueño, Stock de Altavista, Stock de Cambumbia, Diorita de Heliconia, Diorita de Pueblito, Batolito de Santa Fe, Ultramáficas y Dunitas de Medellín, unidades descritas en el capítulo Marco Geológico.

La roca ultramáfica localizado al sur de Ebéjico es una dunita con serpentización parcial y forma parte de una serie de cuerpos de rocas ultramáficas distribuidas en los mapas 130, 146 y 166.

Los afloramientos rocosos muestreados en el Batolito Antioqueño e identificadas como MMS 2013 (Carretera San Pedro-Medellín, sector San Félix) y MMS 2016 (Carretera Don Matías Medellín, 1 Km después del alto de Matasanos), ubicados en el talud de las carreteras, presentan unas dimensiones de 50 m de largo y 9 m de alto, y 50 m de largo por 4 m de alto, respectivamente, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 9 y 4 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es moderadamente fracturado y macizo. Las rocas son graníticas, tipo tonalitas, color blanco y gris muy claro (N9 a N8). La resistencia de la roca es moderadamente

fuerte a fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La roca presenta ligera alteración a minerales de arcilla y la formación de algunos óxidos. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos tipo micas (Tabla 23).

El afloramiento rocoso muestreado en el Stock de Altavista e identificado como MMS 2015 (Carretera Medellín Palmitas 500m al oriente del Boquerón), ubicado en el talud de la carretera, presenta unas dimensiones de 5 m de largo y 3 m de alto, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 2 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es moderadamente fracturado y macizo. La roca es granítica, tipo diorita, color gris medio (N5) (GSA, 1984). La resistencia de la roca es muy fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La roca no presenta alteración visible. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos, tipo micas (Tabla 23).

El Stock de Cambumbia fue muestreado en la estación 1993, en la carretera Pintada – Arma, ubicado en el talud de las carreteras, con dimensiones de 40 m de largo y 6 m de alto en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 6 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es muy fracturado. Industrialmente la roca es un granito, tipo diorita., color gris medio oscuro (N4). La resistencia de la roca es moderadamente fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La roca presenta alteración a minerales micáceos, arcillosos y calcáreos. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos tipo micas y arcillas.

La unidad de roca Diorita de Heliconia fue muestreada en la estación MMS 1957 (Carretera La Gramala), ubicada en el talud de la vía, con dimensiones de 3 m de largo y 4 m de alto en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 3 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es macizo. La roca es un granito (sentido industrial), tipo diorita, color gris medio (N5) (Figura 67). La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La roca presenta alteración a minerales arcillosos y anfibólicos. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos tipo micas y arcillas (Tabla 23).



Figura 67. Muestras de roca de la Diorita de Heliconia. Carretera Ebéjico – Heliconia.
Fotografía: el autor

Los afloramientos rocosos muestreados en la unidad de roca Diorita de Pueblito e identificadas como MMS 1958 (Carretera Amagá – Bolombolo, km 3 al occidente de Camilo C) y MMS 1976 (Carretera Don Matías Medellín, 1 Km después del alto de Matasanos), ubicados en el talud de las vías, presentan unas dimensiones de 40 m de largo y 8 m de alto, y 30 m de largo por 4 m de alto, respectivamente, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 8 y 4 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es muy fracturado y triturado. Las rocas son granitos (término industrial), tipo diorita (término geológico), color gris medio oscuro y gris medio claro (N4 a N6). La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La roca presenta ligera alteración a minerales de arcilla y la formación de algunos óxidos. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos tipo micas y arcillas (Tabla 23).

El Batolito de Santa Fe (antes Sabanalarga) fue muestreado en la estación MMS 1966 (vía Santa Fe de Antioquia - Cañasgordas, Km 1), ubicado en el talud de la carretera, con dimensiones de 100 m de largo y 20 m de alto, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 2 m (Figura 68). En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es moderadamente fracturado. Industrialmente la roca es una diorita. La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La

roca presenta alteración a minerales arcillosos. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos tipo micas y arcillas (Tabla 23). De otra parte, esta roca presenta, con regularidad, textura milonítica que se evidencia por la formación de planos paralelos en la roca, lo cual podría generar partículas planas y alargadas después del proceso de trituración de la roca.



Figura 68. Afloramiento rocoso en el Batolito de Santa Fe (antes Batolito de Sabana-larga). Fotografía: el autor

Los afloramientos rocosos muestreados en la Metaharzburgita de Medellín y en un cuerpo de rocas ultramáficas al sur de Ebéjico, estaciones MMS 2004 (Carretera Medellín Bogotá, sector Curva de Rodas y 1959 (Carretera Ebéjico - Guayabal), ubicados en canteras abandonadas para áridos y mineral de magnesio, respectivamente, presentan unas dimensiones de 30 m de largo y 5 m de alto, y 6 m de largo por 6 m de alto, respectivamente, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 6 y 5 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el bandeamiento y diaclasamiento en el primer afloramiento y el cizallamiento en el segundo. El grado de fracturación es muy fracturado y triturado. Las rocas son granitos negros (término industrial), tipo dunita (término geológico), colores verde grisáceo y gris oscuro (10 GY 5/2 a N3), respectivamente. La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es rugosa y lisa, respectiva-

mente. La roca presenta alteración con formación de serpentinita y anfíboles fibrosos, tipo antigorita, tremolita, calcita, talco y óxidos de hierro. En esta unidad existe una cantera activa (Figura 69).



Figura 69. Operación extractiva en la Metaharzburgita de Medellín. Vía Medellín – Guarne.
Fotografía: el autor

En síntesis, en este conjunto se tienen cuatro tipos de rocas, cuarzomonzonitas (ricas en feldespato), dioritas, tonalitas y dunitas (rocas ultramáficas). Todas las muestras tienen absorción aceptable - menor que 3% (Tabla 36). Todas las muestras tienen un peso específico aparente válido para la elaboración de hormigón (menor que 3 g/cm^3), a excepción de las muestras de la unidad Diorita de Pueblito, las cuales tienen valor mayor de 3 g/cm^3 , con lo cual podrían ser utilizados como áridos pesados.

Los valores del desgaste en la Máquina de Los Ángeles deben ser menores de 50% según la NTC y menores que 40% según INVIAS. Las demás unidades presentan valores aceptables según la normativa, valores intermedios en las rocas del Batolito Antioqueño y en la Diorita de Heliconia (23 a 33%), bajos en las dioritas de Dunitas de Medellín, Altavista, Sabanalarga y Pueblito, entre 6 y 21% (Tabla 36).

El ensayo de partículas livianas ha permitido determinar, de manera regional, la presencia superior a lo requerido por la normativa colombiana (menor que 1%, NTC e INVIAS) de partículas livianas en rocas de las unidades Stock de Altavista,

Stock de Amagá, Batolito Antioqueño, Stock de Cambumbia, Diorita de Heliconia, Diorita de Pueblito y Batolito de Sabanalarga, en las cuales los valores obtenidos están representados por la presencia de minerales micáceos, principalmente. Las rocas ultramáficas, cuando tienen serpentinización, pueden presentar minerales débiles como anfíboles fibrosos y serpentina, los cuales afectan desfavorablemente al material como árido para ser empleado en mezclas de hormigón o mezclas bituminosas.

5.5.4 Material Pobre – Nocivo (PL)

Materiales compuestos por rocas ígneas ([Figura 57](#)) con calidad física pobre y calidad química nociva por la presencia de partículas livianas. Están conformados por la unidad rocosa Stock de Amagá. La descripción litológica de esta unidad se puede ver en el apartado Macizos rocosos para arena y grava.

El Stock de Amagá fue muestreado en la estación MMS 1972, Carretera Caldas - Amagá, ubicada en el talud de la vía, con dimensiones de 15 m de largo y 4 m de alto, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 3 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es moderado. La roca es un granito (término industrial), y corresponde a una granodiorita – cuarzomonzonita en términos petrográficos. La resistencia de la roca es moderada y la textura de su superficie es cristalina. La roca presenta alteración a minerales arcillosos. La composición mineralógica indica que estas rocas pueden contener minerales nocivos tipo micas y arcillas.

Los resultados de los ensayos físicos realizados a la muestra del Stock de Amagá se presentan en las [tabla 36](#). Esta roca tiene un peso específico de 2,642 g/cm³, localizado por debajo del límite superior empleado por las empresas (2,95 g/cm³). El valor de absorción es de 1,31%, que debe ser menor de 3%. Los valores del desgaste en la Máquina de Los Ángeles deben ser menores de 50% según la NTC 174 y menores que 40% según INVIAS. El valor obtenido para una muestra del Stock de Amagá fue de 56,6%, lo cual no satisface la especificación requerida. El ensayo de partículas livianas muestra un valor igual a 1,6%, superior al permitido por la normativa de INVIAS –(menor que 1%).

5.5.5 Material Pobre – Inofensivo

Estos materiales están distribuidos en el conjunto de rocas ígneas ([Figura 57](#)) y corresponden a rocas con calidad física pobre y calidad química inofensiva. Están representados por las unidades de roca denominadas Gabro de Romeral y Gabro de Hispania.

Las exposiciones rocosas muestreados en las unidades de roca Gabro de Romeral y Gabro de Hispania son las estaciones MMS 1953 en la Conexión vial valles Aburrá y Cauca, sector Palmitas – Ebéjico, y MMS 1989 en la carretera Bolombolo-Hispania, 4 km antes de Hispania. Las estaciones expuestas en el talud de las vías presentan unas dimensiones de 70 m de largo y 8 m de alto, y 100 m de largo por 15 m de alto, respectivamente, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 6 y 15 m. En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento. El grado de fracturación es muy fracturado. Las rocas son granitos (término industrial), tipo gabro y microgabro (término geológico), de colores gris medio y gris verde oscuro (N5 a 5G 4/1). La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La roca presenta ligera alteración como oxidación en la primera roca, y serpentización y carbonatación, en la segunda.

Los resultados de los ensayos físicos ([Tabla 36](#)) indican que los gabros tienen una absorción muy baja, 0,03% y 0,2% (menor que 3%) y peso específico de 2,961 y 2,968 g/cm³ y muy cerca de la especificación de requerida, que es menor que 3 g/cm³.

La muestra del Gabro de Romeral dio un bajo desgaste en la Máquina de Los Ángeles, 8,6%, y el Gabro de Hispania dio un desgaste de 24,3% ([Tabla 36](#)). Estas rocas están generalmente muy meteorizadas y generalmente presentan una estructura de planos paralelos (debido al cizallamiento), lo cual puede generar una gran cantidad de partículas planas en el proceso de trituración. Por estas razones se ha establecido una calidad física preliminar pobre para las unidades en conjunto a pesar del buen resultado del ensayo de la Máquina de Los Ángeles.

5.6 Rocas metamórficas para áridos de machaqueo

5.6.1 Material Aceptable - Nocivo AS-PL

Este material se encuentra distribuido en las rocas metamórficas (Figura 70) y corresponde a rocas con calidad física aceptable y calidad química nociva por potencialidad con la reacción álcali - sílice y por la presencia de partículas livianas. Son rocas que pertenecen a las unidades Gneis de Palmitas y las Granulitas y migmatitas de El Retiro.

Las unidades de rocas Gneis de Palmitas y Granulitas y Migmatitas de El Retiro, descritas en el capítulo Marco Geológico, fueron muestreadas en las estaciones MMS 1952, en la conexión vial valles Aburrá-Cauca, sector La Volcana, Guayabal, y MMS 2001, carretera Alto de las Palmas-Envigado, Loma del Escobero. Las rocas están ubicadas en los taludes de la vía, el primero en un corte muy reciente de la nueva carretera y presentan unas dimensiones de 200 m de largo y 18 m de alto, y 200 m de largo y 9 m de alto, en el cual el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 12 m en el primero y el nivel III – Moderada meteorización tiene un espesor de 8 m en el segundo (Figura 71). En estos niveles, la discontinuidad más frecuente es el diaclasamiento y la estructura gnéisica en ambos sitios. El grado de fracturación es moderadamente fracturado. Las rocas son granitos (término industrial), tipo gneis cuarzo feldespático (término geológico) de color gris medio (N5). La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es cristalina. La roca del Gneis de Palmitas es sana mientras que el Gneis del Retiro presenta alteración a arcillas. Las micas y el cuarzo deformado presentes en estas rocas son constituyentes indeseables en los áridos para hormigón (Tablas 23).

Los resultados de los ensayos físicos realizados a las muestras de esta unidad se presentan en la Tabla 38. Estos granitos (término industrial) o gneis cuarzo feldespático (término geológico), tienen una absorción de 1 y 2,14%, (menor que 3%, según ASTM) y un buen peso específico aparente, 2,761 y 2,694 g/cm³ (Estándar aceptable: 2,3 a 2,95 g/cm³)

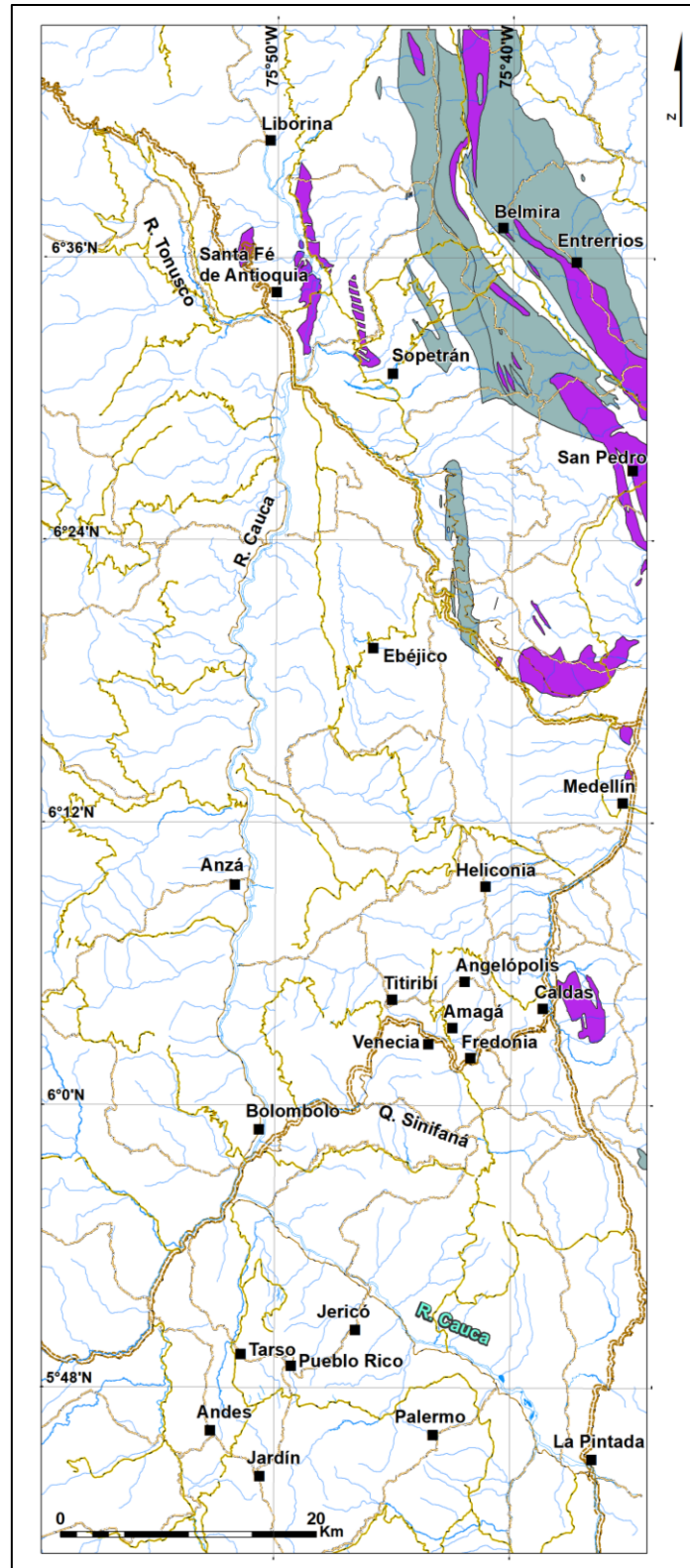


Figura 70. Distribución de las rocas metamórficas: migmatitas y neises (gris), anfibolitas (magenta). Ríos: línea azul; vías: línea gris.

Fuente: Modificado de Calle et al. (1980); Mejía et al. (1983a); Mejía et al. (1983b).



Figura 71. Afloramiento del Gneis de Palmitas, carretera Medellín – Sopetrán.
Fotografía: el autor

Tabla 34. Resultados de ensayos físicos realizados a muestras de roca metamórfica para piedra triturada.

Muestra	Unidad de roca	Peso específico aparente (g/cm ³)	Absorción (%)	Desgaste Máquina de Los Ángeles (%)	Partículas livianas (%)
MMS 1952-1	Palmitas, Gneis	<u>2.761</u>	<u>1</u>	<u>15.4</u>	<u>0.15</u>
MMS 1962	Sucre, Anfibolita de	2,985	<u>0.4</u>	<u>39.6</u>	
MMS 1964	Cajamarca, Complejo (cuarcita)	<u>2.639</u>	<u>0.7</u>	<u>21.7</u>	
MMS 1998	Medellín, Anfibolita	2,945	<u>0</u>	<u>10.9</u>	<u>0.25</u>
MMS 2000	Medellín, Anfibolita	3,01	<u>0.6</u>	41,9	1,65
MMS 2001	Retiro, Gneises y Migmatitas	<u>2.694</u>	<u>2.14</u>	<u>27.4</u>	2,15
MMS 2009	Cajamarca, Complejo (cornubiana)	<u>2.729</u>	<u>0.96</u>	<u>26.9</u>	3,15

###: Valor aceptable; #,##: Valor no aceptable; Ver [Tabla 6](#) para consultar las especificaciones requeridas.

Tabla 35. Resultados de los ensayos químicos realizados en muestras de rocas metamórficas.

Muestra	Unidad de Roca	Sulfatos (%)	Álcali – Árido		Potencialidad
			Concentración Sílice (Sc) (mmol/l)	Reducción de alcalinidad (Rc) (mmol/l)	
1964	Cajamarca, Complejo		85,6	117	<u>No</u>
2000	Medellín, Anfibolitas	<u>0,028</u>			
1998	Medellín, Anfibolitas	<u>0,028</u>			
1952-01	Palmitas, Gneis de	<u>0,014</u>	112,8	-	No disponible
2001	Retiro, Gneises y Migmatitas		44	237,5	<u>No</u>

Ver [Tabla 6](#) para consultar las especificaciones requeridas.

La muestra del Gneis de Palmitas tuvo un desgaste de 15,4% y la de El Retiro, 27,4%, valores bastante buenos según la normativa ([Tabla 38](#)). Estas rocas presentan una estructura de planos paralelos (estructura gnéisica) y por lo tanto puede generar una gran cantidad de partículas planas en el proceso de trituración lo que representa la presencia de componentes minerales no deseados en los áridos para hormigón ([Tabla 23](#)).

El ensayo de partículas livianas muestra al Gneis de Palmitas ([Figura 72](#)) con un valor de 0,14% (debe ser menor que 1%) y a la muestra del Gneis del Retiro con un resultado de 2,15%, por encima del mínimo permitido. Los análisis de la reacción álcali – sílice no mostraron ningún resultado para la muestra del Gneis de Palmitas (situación de dificultad en el laboratorio) y dio negativo para la muestra del Gneis del Retiro. Sin embargo, debido a la alta deformación de los cuarzos, en este trabajo se dejan estas unidades como potencialmente reactivas hasta obtener nuevos datos que permitan confirmar o desvirtuar esta valoración hipotética.

El ensayo de contenido de sulfatos en la muestra del Gneis de Palmitas tuvo como resultado un valor de 0,014%, cuyo valor máximo permitido para su uso en vías es 1,2% ([Tabla 6](#))

Es importante indicar que se muestrearon varios lugares pertenecientes a cuarcitas micáceas del Complejo Cajamarca y corneanas, formadas por el metamorfismo de contacto de rocas graníticas en esquistos micáceos. Estas rocas no están representadas en los mapas geológicos como unidades de roca en polígonos individuales, sin embargo, se hizo el muestreo y ensayo de las rocas para conocer su comportamiento físico y químico y evaluar su potencialidad.



Figura 72. Muestra de roca del Gneis de Palmitas.
Fotografía: el autor

En las [figuras 73](#), [74](#) y [75](#) se presentan los resultados de ensayos hechos a material proveniente de las unidades de rocas metamórficas, y su comparación con las rocas ígneas, con potencialidad para ser utilizados como áridos de machaqueo.

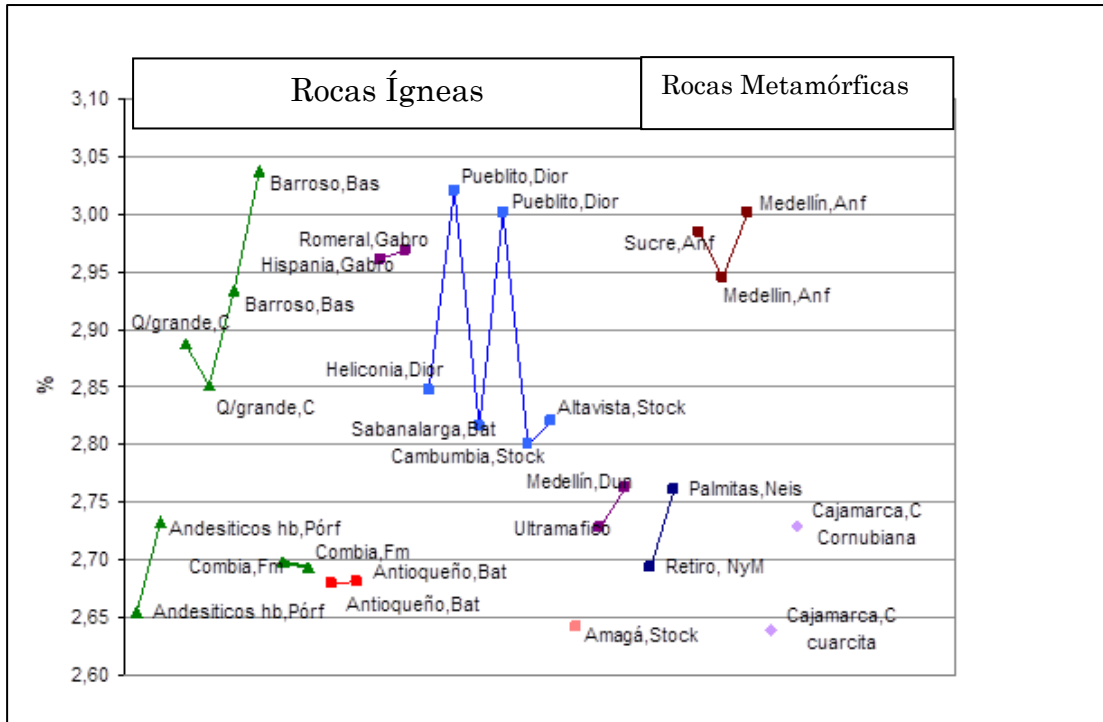


Figura 73. Valores del peso específico aparente de rocas metamórficas y su comparación con las rocas ígneas con potencialidad para áridos de machaqueo

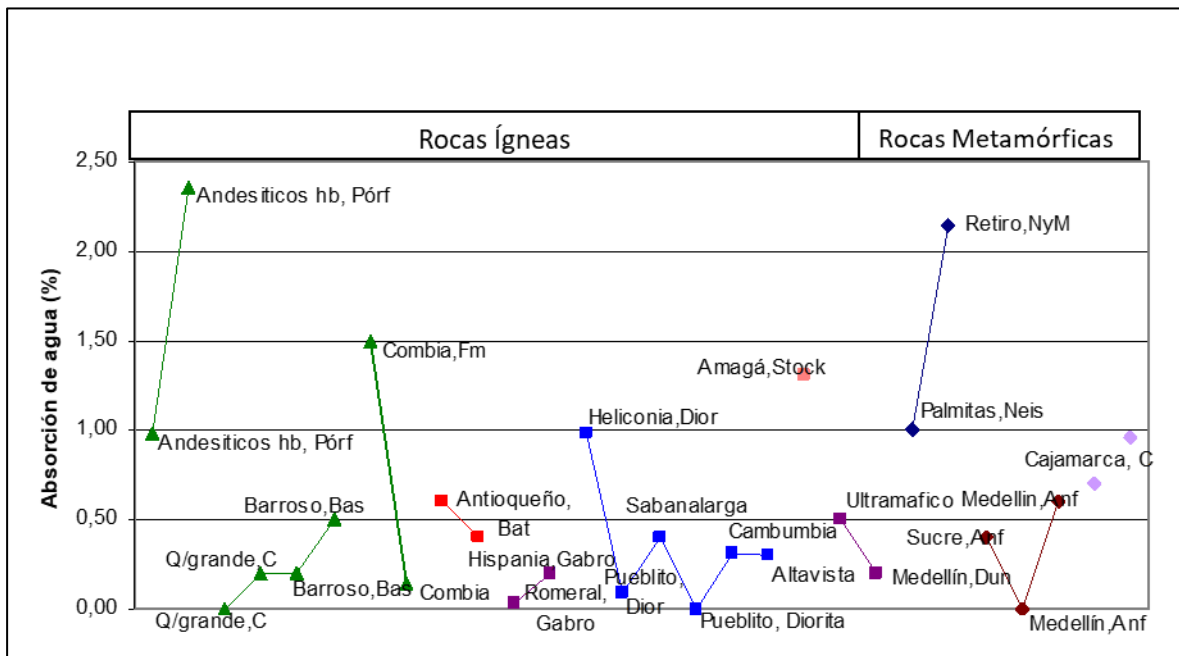


Figura 74. Valores de la absorción de materiales potenciales en rocas metamórficas para áridos de machaqueo y su comparación con las rocas ígneas.

moderadamente fracturado, respectivamente. Las rocas tienen color gris medio (N5). La resistencia de la roca es moderadamente fuerte y fuerte, respectivamente, y la textura de su superficie es cristalina y rugosa, respectivamente.



Figura 76. Muestras de cuarcitas y esquistos cuarzo micáceos del Complejo Cajamarca.

Fotografía: el autor

Los resultados obtenidos en los ensayos (Tabla 38) indican que estas rocas tienen una absorción de 0,7 y 0,96% (menor que 3%) y un peso específico aparente, 2,639 y 2,729 g/cm³ (2,3 a 2,95 g/cm³). La muestra de cuarcita tuvo un desgaste de 21,7% y la cornubiana, 26,9%, valores aceptados por debajo del 50% requerido como máximo.

El ensayo de partículas livianas en la cornubiana presenta un valor de 3,15%, por encima del mínimo permitido (debe ser menor que 1%). El ensayo de la reacción álcali – sílice presentó un resultado negativo para la cuarcita (Tabla 39). No se realizó el ensayo en la cornubiana.

5.6.2 Material Pobre – Nocivo PL

Este material se encuentra en las rocas metamórficas (Figura 70) y corresponde a rocas con calidad física pobre y calidad química nociva por partículas livianas. Las rocas pertenecen a las unidades Anfibolitas de Medellín y Anfibolitas de Sucre. Los resultados de los ensayos físicos y químicos realizados a las muestras de materiales de esta unidad de roca se presentan en las Tablas 40 y 41.

La Anfibolita de Medellín fue muestreada en los sitios identificados como MMS 1998, carretera Medellín – El Retiro, Sitio entre Ipacarai y Las Flores y MMS 2000, vereda Yarumal, Corregimiento de Santa Elena, Medellín, a un lado de la arenera Yarumal. Ambas estaciones están ubicadas ligeramente fuera de la zona de trabajo, pero están estrechamente relacionadas con unidades de roca del área de investigación. Las estaciones se encuentran ubicadas en una cantera activa y en una abandonada, respectivamente. Sus dimensiones son 100 m de largo y 21 m de alto, y 40 de largo y 12 m de alto, en los cuales el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 8 m en el primero y el nivel IV – Alta meteorización tiene un espesor de 8 m en el segundo (Figura 77). En estos niveles, la discontinuidad más frecuente es el bandeamiento y el diaclasamiento. El grado de fracturación es moderadamente fracturado. Las rocas son anfibolitas de color gris medio oscuro (N4 a NY). La resistencia de la roca es fuerte y la textura de su superficie es cristalina (Figura 78).

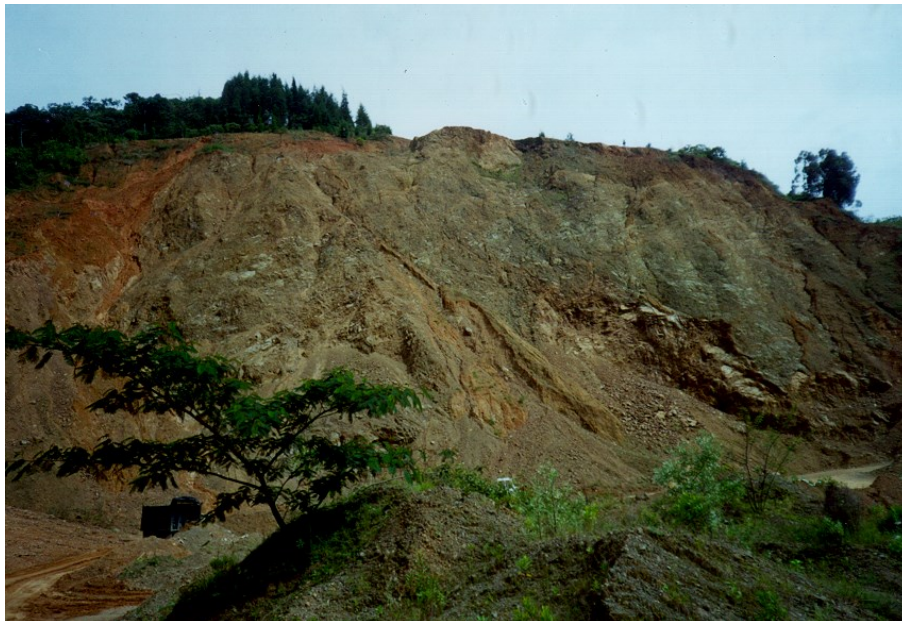


Figura 77. Afloramiento rocoso de la anfibolita de Medellín.

Fotografía: el autor



Figura 78. Muestras de roca de la Anfibolita de Medellín.

Fotografía: el autor

La unidad de roca Anfibolitas de Sucre fue muestreada en el sitio MMS 1962, carretera Santa Fe de Antioquia – Sopetrán, ubicada en la vía. Las dimensiones son 100 m de largo y 9 m de alto, en el cual el nivel I – Roca Fresca del perfil de meteorización tiene un espesor de 9 m (Figuras 79, 80). En este nivel, la discontinuidad más frecuente es el bandeamiento y el diaclasamiento. El grado de fracturación es extremadamente fracturado. La roca es una anfibolita de color gris medio azulado (5B5/1). La resistencia de la roca es moderadamente fuerte y la textura de su superficie es cristalina.



Figura 79. Afloramiento rocoso de la Anfibolita de Sucre. Carretera Santa Fe de Antioquia - Sopetrán.

Fotografía: el autor

Los resultados de ensayos físicos (Tabla 38) muestran que todas las anfibolitas tienen una absorción muy baja, de 0,4 a 0,6 % - debes ser menor que 3%, y un peso específico aparente de 2,945 a 3,01 g/cm³ superior a la especificación requerida que es mayor de 2,55 g/cm³, según la NTC-174 (Tabla 6)

Las anfibolitas presentaron valores de 39,6% y 41,9%, en el ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles, cerca del límite máximo permitido de 50%, aunque otra muestra de anfibolita dio un valor de 10,9%. Debe tenerse en cuenta la estructura en bandas centimétricas que posee esta roca, lo cual puede afectar a su rendimiento al desgaste, entre otros ensayos, además de poder presentar un índice grande de partículas planas después de la trituración de las rocas.

El ensayo de partículas livianas presentó dos valores entre 0,25 y 1,65% para las Anfibolitas de Medellín, por debajo y por encima del límite máximo permitido, que debe ser menor que 1%, NTC e INVIAS.



Figura 80. Corte en la carretera con afloramiento de rocas de las Anfibolitas de Sucre.

Fotografía: el autor

Se destaca que las rocas de la unidad Anfibolitas de Medellín presenta sectores con fuerte meteorización física con generación de material del tipo árido fino, el cual es extraído en el sector de Machado, al norte de Medellín y utilizado como arena para mampostería después de un beneficio.

6. Síntesis de la oferta y la demanda de áridos en Medellín

El Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas -DANE (2023), realizó la actualización post COVID – 19 de las proyecciones de población, teniendo en cuenta los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda – CNPV-2018. Se estima que la población total del departamento de Antioquia en 2023 representa el 13,12% de la población total de Colombia, con 6.848.360 de personas. Se calcula que en Medellín y sus municipios vecinos, sector correspondiente al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, habitan 4.146.548 personas (UPME, 2023).

La ciudad de Medellín forma parte de una entidad administrativa llamada Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que incluye a los municipios de Barbosa, Girardota, Bello, Medellín, Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella y Caldas. En este sector y alrededores se han venido realizando un número apreciable de proyectos urbanísticos de conjuntos habitacionales, áreas recreativas, teatros, centros deportivos y vías internas y de conexión con los demás municipios del departamento de Antioquia y otras ciudades de Colombia. Además, continúa el avance de la movilidad urbana con el sistema Metro de Medellín, tanto de vía terrestre como en Metro Cable, un tranvía en el centro de la ciudad de Medellín y un tren de cercanías, que iniciará próximamente su construcción.

6.1 Análisis de la oferta de gravas para Medellín

6.1.1 Producción nacional de gravas en el período 2016-2022

La producción nacional acumulada de gravas en el período 2016 - 2022 fue de 81.238.256 m³ (Figura 81). La producción creció hasta 2019 con un máximo de 13.828.138 m³ en 2019 y luego decreció hasta el año 2021 con un mínimo de 9.722.378 m³. Reinició el crecimiento en 2022 (ANM, 2023b, UPME, 2023).

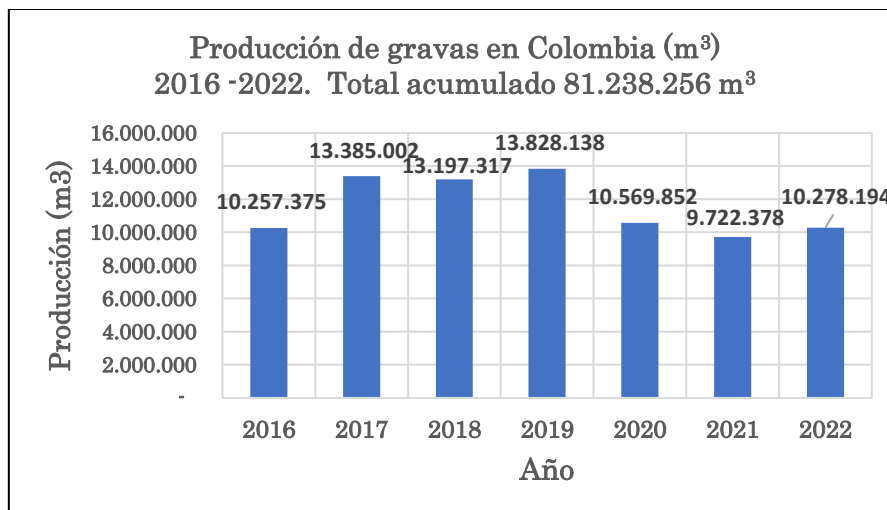


Figura 81. Cantidad de la producción de gravas en Colombia 2016 – 2022.

Fuente: [UPME, 2023](#))

6.1.2 Producción de gravas en el área de influencia de la ciudad de Medellín

En el estudio “Evaluación de la situación actual y futura del mercado de materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero” ([UPME 2023](#)) se reportaron 13 clúster de producción de gravas, que atendían la demanda del sector de la construcción en la ciudad de Medellín en el año 2013. De acuerdo con la información de producción objeto de regalías de la Agencia Nacional de Minería¹³ en el período 2016-2022, se reportaron volúmenes por 5.331.820 m³.

La producción acumulada de gravas en el período 2016- 2022 en el área de influencia de la ciudad de Medellín fue de 5.331.820 m³ ([Figura 82](#)). La curva de producción presentó una tendencia ascendente hasta el año 2017, evidenciando un pico máximo de 1.240.016 m³ y un descenso hasta el año 2021 con una producción mínima de 119.840 m³. En 2022 se presentó la máxima producción en el período de análisis con un pico de 2.010.005 m³ ([ANM, 2023b](#); [UPME 2023](#)) ocasionado por la construcción de edificaciones ([Figura 83](#)) y el proyecto de autopistas 4G.

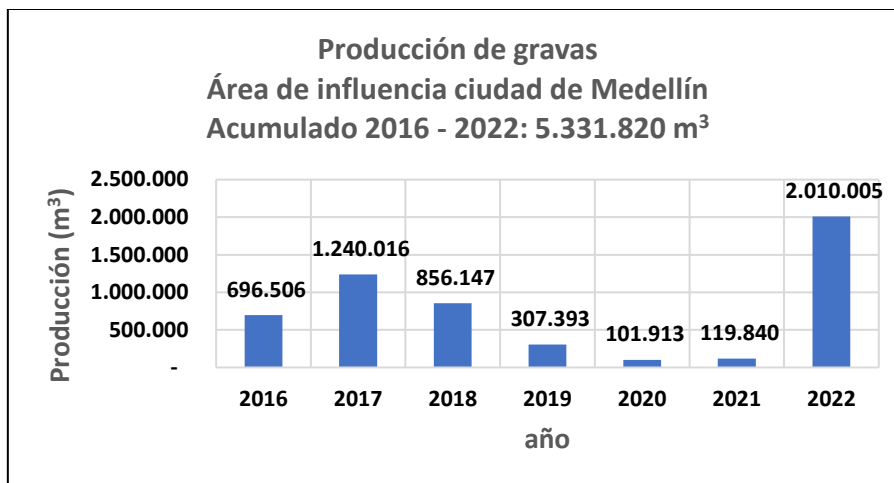


Figura 82. Producción gravas área de influencia de la ciudad de Medellín.

Fuente: [UPME, 2023](#))



Figura 83. Construcción de edificaciones de vivienda, oficinas y centros deportivos en la ciudad de Medellín.

Fotografía: el autor

Entre 2016 y 2022 los precios de las gravas en Antioquia presentan una fuerte variación; en particular, en 2019 llegó al precio más alto con 64.000 COP/m³ (19,54 USD corrientes) y disminuyó en 2020 a 47.000 COP/m³ (14,35 USD corrientes) ([Figuras 84, 85](#)). Después de 2021, los precios han venido aumentando en los valores COP – Pesos colombianos ([UPME, 2023](#))

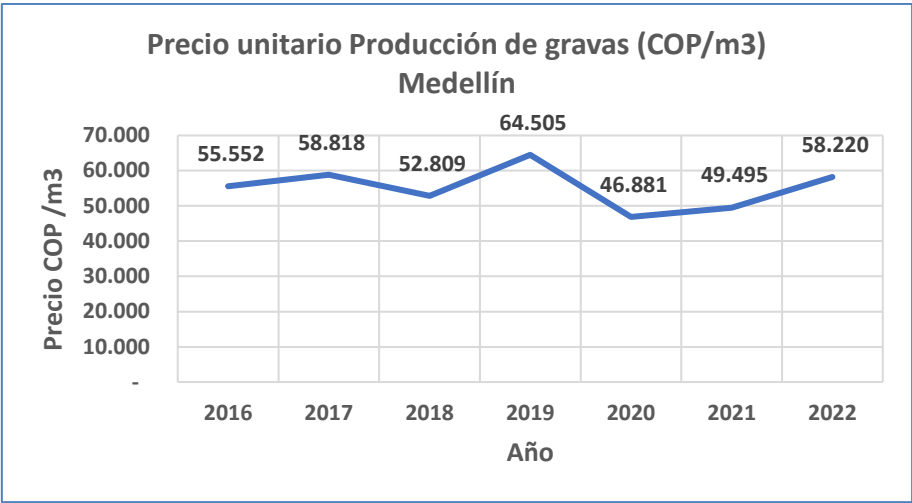


Figura 84. Precio unitario en mina de las gravas para áridos en Medellín (Pesos corrientes).

Fuente: ANM (2023b); UPME (2023)

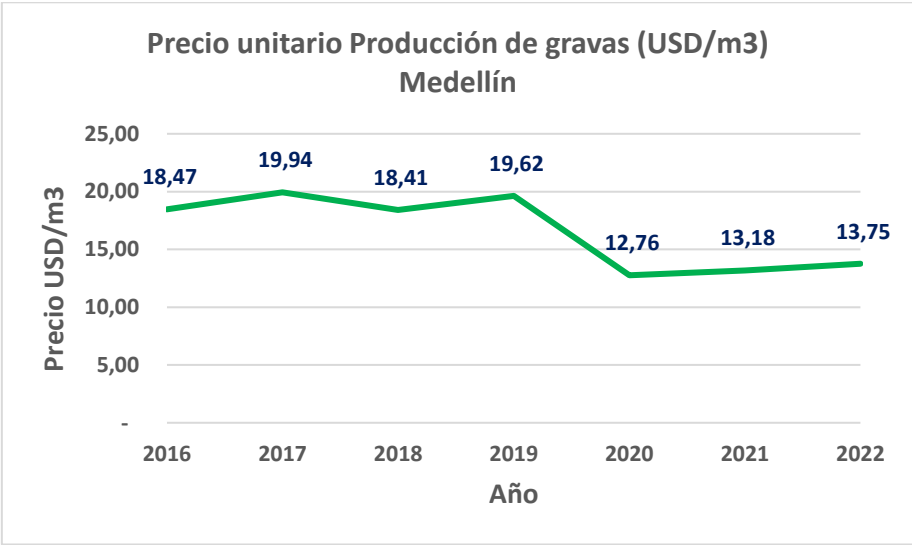


Figura 85. Precio unitario en mina de las gravas para áridos en Medellín (Dólares americanos corrientes).

Fuente: ANM (2023b); UPME (2023) y Gobierno de Colombia (2024)

6.2 Análisis de la oferta de arenas para Medellín

6.2.1 Producción nacional de arenas reportada para regalías en el período 2016-2022

La producción de arenas en Colombia en el período 2016-2022 fue de 37.157.807 m³. La curva de producción presentó una tendencia ascendente hasta el año 2017, evidenciando un pico máximo de 6.741.930 m³. La producción descendió luego hasta 2022 con 4.086.914 m³ (ANM, 2023b; UPME, 2023) (Figura 86).

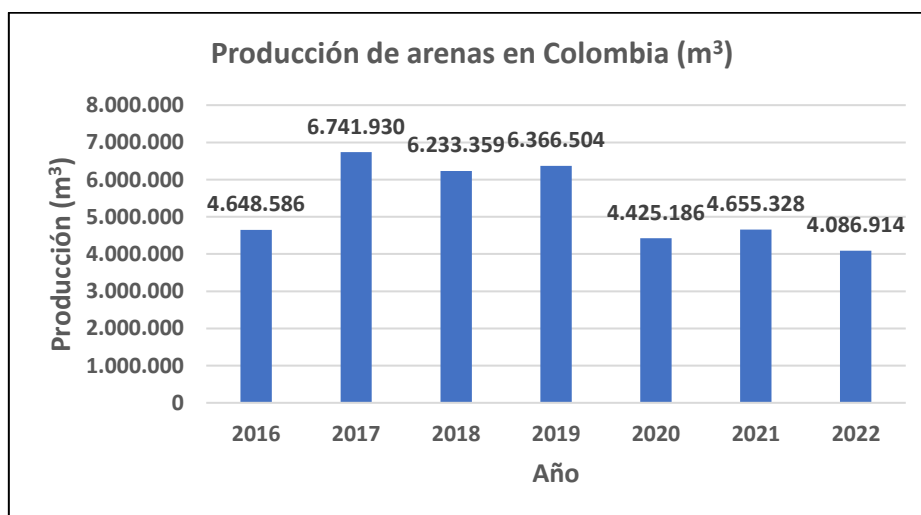


Figura 86. Producción de arenas en Colombia 2016-2022.

Fuente: ANM (2023b); UPME (2023)

6.2.2 Producción de arenas en Medellín (Área Metropolitana del Valle de Aburrá)

La producción acumulada de arenas en el período 2016- 2022 en el área de influencia de la ciudad de Medellín fue de 1.951.108 m³ (Figura 87). La producción empezó a disminuir a partir de 2017 hasta 2021, con un mínimo de 142.450 m³ (Año 2021). En 2022 se multiplicó la producción, después del tiempo de pandemia 2020 (ANM, 2023b; UPME, 2023).

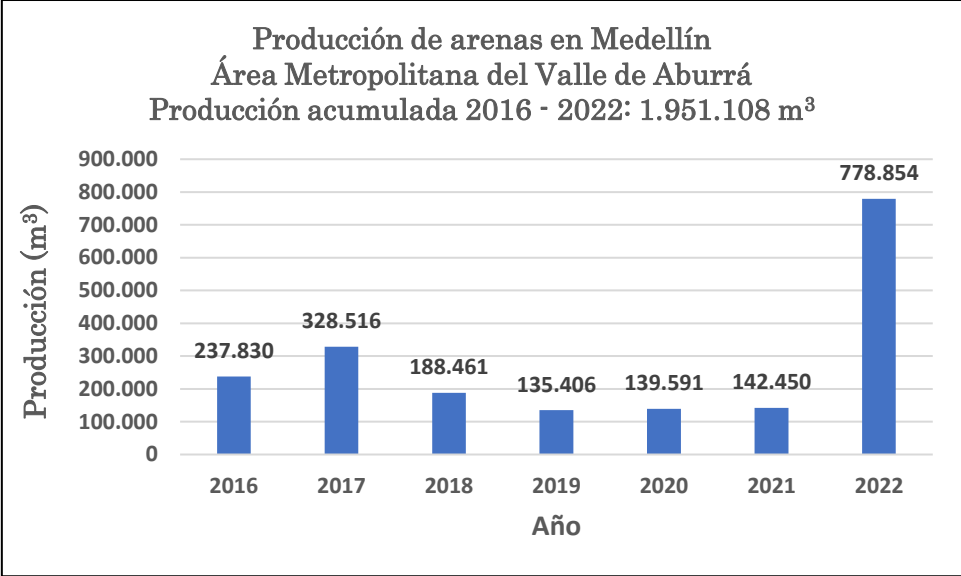


Figura 87. Producción de arenas en el área de influencia de Medellín, 2016 -2022.

Fuente: ANM (2023b); UPME (2023)

El precio en mina de las arenas se ha incrementado de manera, con un valor de 29.700 COP (10,39 USD) en 2018 hasta 57.827 COP (13,65 USD) en 2022 (Figuras 88, 89). Este comportamiento responde a las dinámicas locales del mercado.

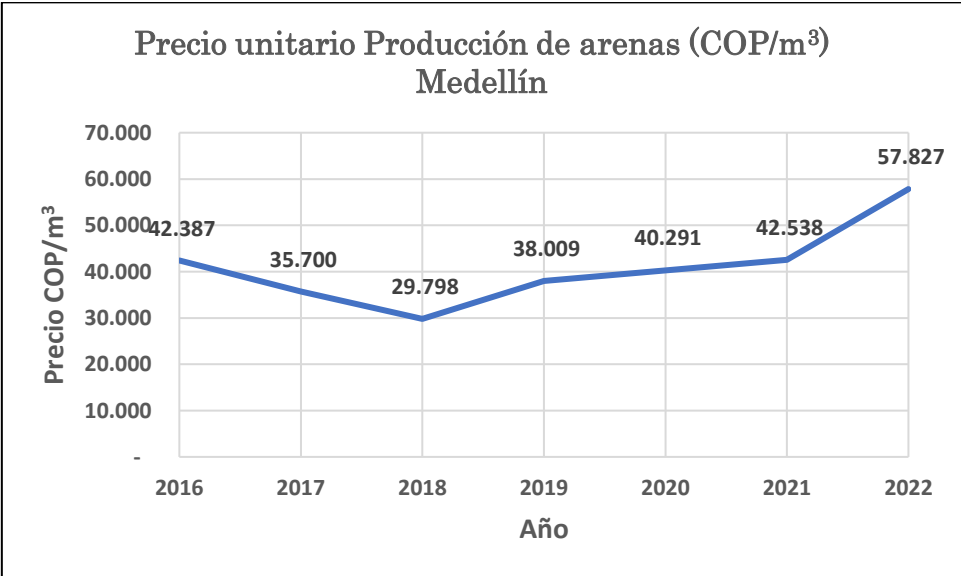


Figura 88. Precios unitarios de la arena en Medellín 2016 – 2022. Pesos corrientes.

Fuente. INVIAS (2023)

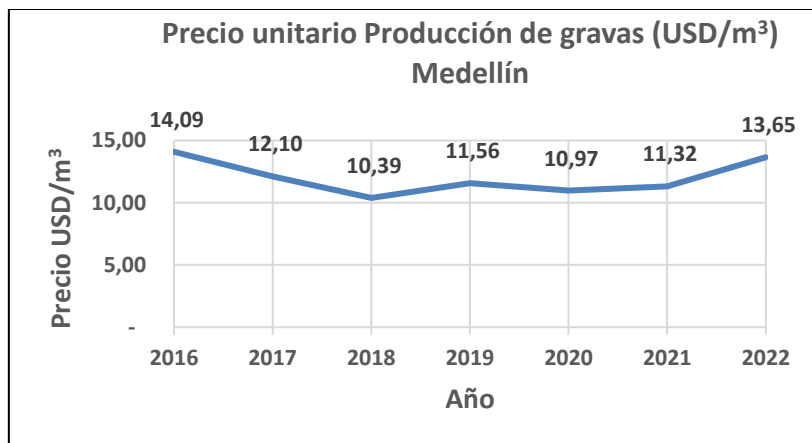


Figura 89. Precios unitarios de la arena en Medellín 2016 – 2022 (USD corrientes)

Fuente: [INVIAS \(2023\)](#), [Gobierno de Colombia \(2024\)](#)

6.3 Demanda de materiales. Construcción de edificaciones en Medellín (2016 - 2022)

Entre 2016 y 2022, en Medellín se construyeron más de 20,3 millones de m² de edificaciones tipo oficinas, naves industriales, centros comerciales o centros deportivos. Similarmente a lo ocurrido a nivel del país, en 2020 hubo una reducción de 32% respecto al 2019. Aunque luego hubo un crecimiento en 2021 de más de 20%, para 2022 aún no recupera niveles de construcción de prepandemia ([Figuras 90, 91](#)) ([UPME, 2023](#)).



Figura 90. Área construida en edificaciones en Medellín 2016 -2022

Fuente: ([DANE, 2023](#))



Figura 91. Construcción de edificios para vivienda urbana y oficinas en el sector sur del Área Metropolitana, Medellín.
Fotografía: el autor

En cuanto a la dinámica del área destinada para vivienda, Medellín presenta mayor variabilidad en la tasa de crecimiento respecto al comportamiento nacional y para 2022 logró el mayor crecimiento por encima del 101% con respecto al año anterior (UPME, 2023) (Figura 92).

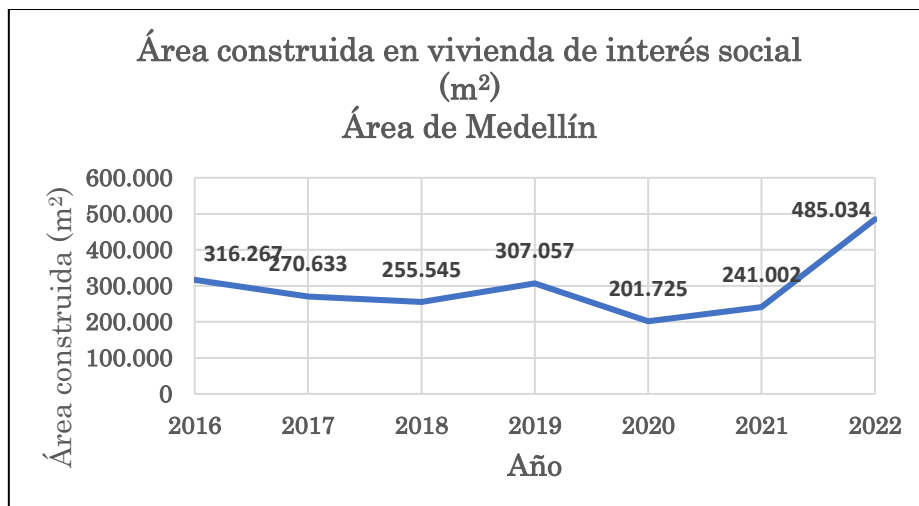


Figura 92. Área construida (m²) en vivienda en Medellín.

Fuente: [DANE \(2023\)](#)

La demanda de materiales de construcción en Medellín totalizó 8,77 millones de toneladas para 2013, que incluye la continua construcción de sistema de movilidad urbana con Metro y Metro cables ([Figura 93](#)). Desde 2008, la variación promedio en el número de toneladas de materiales enviados a Medellín ha sido del 2% anual, con un consumo de áridos de 2500 kg/habitante ([UPME, 2023](#)).



Figura 93. Línea central del Metro de Medellín con planes de expansión

Fuente: [Metro de Medellín \(2024\)](#)

6.4 Alternativas de oferta y demanda a corto plazo (2023 – 2026) para vías de transporte

Dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 del gobierno colombiano, se han establecido puntos estratégicos relacionadas con la gestión integral de suelo y se plantea el desarrollo de proyectos de inversión con prioridad en temas de vivienda y la consolidación de la red de infraestructura nacional. De esta manera, es de alta importancia la verificación de la oferta a corto plazo de arenas y gravas como materia prima para la demanda de los sectores de hábitat e infraestructura de transporte (UPME, 2023). El plan de intervención y mejoramiento en las vías intermunicipales y locales en el período 2023 – 2026 (Figura 94) presenta una demanda proyectada de 4.4 millones de m³, claramente mucho mayor que la oferta de materiales (Tabla 40).



Figura 94. Autopista Medellín – Manizales. Programa de interconexión nacional.
Fotografía: el autor

Tabla 36. Oferta y demanda de áridos en el plan de mejoramiento de vías en Colombia, período 2023 – 2026.

Departamento	Longitud (km)	Oferta (m ³ /año)	Demanda (m ³) 2023-2026
<i>Antioquia (incluye área de influencia de Medellín)</i>	2.439	385.595	4.390.200
Cundinamarca	1.888	2.342.209	3.398.400
Boyacá	1.821	400.479	3.277.800
Santander	1.540	287.735	2.771.910
Tolima	1.019	298.907	1.834.200
Huila	867	101.510	1.560.168
Norte de Santander	794	690	1.429.794
Caldas	467	84.784	840.600
Risaralda	197	307.921	354.600
Quindío	145	8.068	260.766
Bogota D.C.	37	363.228	67.194
Total	11.214	4.581.126	20.185.632

Fuente: [UPME \(2023\)](#)

7. Retos, restricciones y propuestas para el desarrollo del suministro de áridos en Medellín

La industria de los áridos en el área metropolitana de Medellín, Colombia, presenta varios retos y restricciones para su desarrollo. La gestión de los pasivos ambientales es un asunto de gran importancia para la sociedad y de fuerte interés en el manejo por parte de las autoridades. Además, el establecimiento y cumplimiento de los planes de rehabilitación ha pasado a ser un requerimiento de gran importancia para la planificación final de las minas. Estos puntos son desarrollados a continuación desde el punto de vista de la legislación colombiana. Se presentan al final de este capítulo algunas propuestas que podrían considerarse en el desarrollo de la industria de los áridos en Medellín, Colombia.

7.1 Gestión de los pasivos mineros generados por la explotación y tratamiento de los áridos.

7.1.1 Estado de la legislación colombiana

La Ley 99 de 1993, artículo 1, Principios generales ambientales, especialmente el principio de precaución, establece que la formulación de las políticas ambientales tendrá en cuenta el resultado del proceso de investigación científica. No obstante, las autoridades ambientales y los particulares darán aplicación al principio de precaución conforme al cual, cuando exista peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces para impedir la degradación del medio ambiente ([Congreso de Colombia, 1993](#)).

La gestión de pasivos ambientales se debe enfocar en un estudio o inventario por parte de las autoridades ambientales, de forma que se puedan analizar los impactos ocasionados por los pasivos ambientales; de igual forma se deben considerar los procesos y actividades por los cuales se afecta la calidad de vida y la salud de los habitantes de comunidades cercanas y sus zonas de riesgo ([Ríos, 2012](#))

Actualmente, en Colombia, el control y presencia del estado en estas actividades extractivas es muy deficiente, por ello, las consecuencias socioambientales que se reflejan en condiciones de salud y de vida de los participantes en el proceso y de igual manera de los habitantes de la región (Pereira y Ariza, 2023)

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del Estado colombiano ha venido concretando propuestas para establecer y reglamentar la gestión de los pasivos ambientales y dictó el Decreto - Ley 20327 de 2023, por medio del cual se establece la definición de pasivo ambiental, se fijan lineamientos para su gestión y se dictan otras disposiciones (Congreso de Colombia, 2023). Este decreto ley establece la definición de pasivo ambiental como cualquier afectación ambiental originadas por actividades antrópicas directa o indirectamente por la mano del hombre, autorizadas o no, acumulativas o no, susceptibles de ser medibles, ubicables y delimitables geográficamente, que generan un nivel de riesgo no aceptable para la vida, la salud humana o el ambiente (Congreso de Colombia, 2023).

La Ley 2327 de 2023 representa un avance significativo en la gestión de pasivos ambientales en Colombia al introducir definiciones y pautas claras. El panorama que brinda Estados Unidos y los países de la Unión Europea que cuentan con normativa sobre pasivos ambientales representan un referente internacional para la implementación efectiva. Sin embargo, esto dependerá a su vez, de suplir la necesidad de un mayor esfuerzo por parte de las instituciones, para llevar a cabo las acciones correspondientes y el efectivo seguimiento al cumplimiento de lo requerido (Universidad Externado de Colombia, 2024)

La Ley 2327 establece una estrategia para la gestión de pasivos ambientales sobre el conjunto de las siguientes actividades:

- Actividades relacionadas con la identificación por sospecha.
- Caracterización del pasivo ambiental.
- Evaluación de riesgos.
- Declaración y registro del PMA.
- Priorización para la atención del PMA.
- Plan de intervención, monitoreo y seguimiento.

Adicionalmente, el Estado colombiano ha creado el Sistema de Información de Pasivos Ambientales como un instrumento único de manejo de la información sobre

la Estrategia para la Gestión de los Pasivos Ambientales. Este sistema contará con el Registro de Pasivos Ambientales (REPA), el cual contendrá, como mínimo, información clara, completa, pública y oportuna sobre la ubicación de los pasivos ambientales declarados en el territorio colombiano, la información sobre los responsables de su intervención y las actividades definidas en los planes para intervenir los pasivos ambientales.

7.1.2 Manejo técnico desde los servicios geológicos.

Según la Asociación de Servicios de Geología y Minas Iberoamericanos ([Guzmán et al., 2020](#)), los pasivos ambientales mineros (PAM) son aquellos elementos tales como instalaciones, edificaciones, infraestructuras, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres, parques de maquinaria o parques de mineral que, estando en la actualidad en entornos de minas abandonadas o paralizadas, constituyan un riesgo potencial permanente para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el ambiente.

Desde el punto de vista de los servicios geológicos se plantea la implementación de un modelo de gestión de pasivos ambientales mineros centrado en los aspectos más técnicos de la gestión y considera el desarrollo de cuatro fases ([Tabla 42](#)), las cuales pueden verse en detalle en ([Guzmán et al., 2020](#)):

Tabla 41. Gestión de Pasivos Ambientales Mineros (PAM)

Fases	Metodologías aplicables a cada fase
Fase I. Identificación, inventario y caracterización de las minas abandonadas y paralizadas	Manual para el Inventario de minas abandonadas y/o paralizadas
Fase II: Evaluación de Riesgos y Clasificación de los PAM	Manual de Evaluación de Riesgos de Minas Abandonadas/Paralizadas – Clasificación de PAM
Fase III: Reprocesamiento y/o reutilización de los PAM	Guía para el Reprocesamiento y/o Reutilización de PAM
Fase IV: Priorización y propuestas de Remediación de PAM	Guía para la priorización y propuestas de remediación de PAM

Fuente: ([Guzmán et al., 2020](#))

7.2 Planes de rehabilitación de los espacios mineros una vez terminado el ciclo de explotación.

El sector de los áridos se enfrenta al reto de la sostenibilidad y al cambio de paradigma de la economía circular. La minería, al tiempo que abastece de materias primas imprescindible para el desarrollo económico, tecnológico y social, puede y debe ser compatible con la conservación del medio ambiente, aprovechando de manera racional, ordenada y eficiente los recursos minerales con el mínimo impacto y asegurando la recuperación de la capacidad productiva de los terrenos tras su explotación o, incluso mucho mejor, dejando un espacio más rico en términos de biodiversidad del que existía antes de la apertura de la cantera ([Mataix et al., 2023](#))

La Unidad de Planeación Minero Energética y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia desarrollaron para el gobierno colombiano un instrumento técnico ambiental con los procedimientos y técnicas necesarias para un desarrollo apropiado para la extracción de materiales de construcción que incluye la fase final correspondiente al plan de cierre de las minas. Este documento constituye una herramienta de consulta y orientación conceptual y metodológica para mejorar la gestión, manejo y desempeño minero-ambiental ([UPME-UPTC, 2015](#)).

Posteriormente, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), organismo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del Estado colombiano, publicó la Guía para la elaboración del plan de cierre y abandono de proyectos mineros ([ANLA, 2022](#)). El alcance de este documento oficial del Estado colombiano define las actividades relacionadas con los aspectos que permitan lograr el objetivo de todo plan de cierre de mina y rehabilitación de los terrenos, para que el usuario, de acuerdo con la magnitud y particularidades de la explotación, las condiciones ecosistémicas, las fases de desarrollo, las características ambientales regionales y locales del área donde se lleva a cabo el proyecto y en el marco de la información entregada en el Plan de Trabajos y Obras (PTO) a la autoridad minera y lo entregado en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) a la autoridad ambiental, se oriente al formular el plan de cierre en cada uno de los escenarios a lo largo de la vida útil del proyecto. Los aspectos y actividades mínimas del plan de cierre y abandono minero son los siguientes ([ANLA, 2022](#)):

- Estabilidad Física
 - Adecuación, recuperación, restauración, rehabilitación y reconformación morfológica del área intervenida acorde con el uso poscierre.
 - Aseguramiento de la estabilidad física del área intervenida y de las estructuras remanentes.
- Estabilidad química
 - Drenaje de mina /relaves: definición del tipo de drenaje, modelamiento de la generación del potencial ácido, alternativas para prevención, control y tratamiento, monitoreo y vigilancia, gestión del riesgo.
 - Remediación, recuperación y rehabilitación del recurso hídrico superficial y subterráneo.
- Suelo
 - Remediación, recuperación y rehabilitación del suelo, conforme su vocación y uso potencial.
- Atmósfera
 - Desarrollo de buenas prácticas para la mitigación y el control de emisiones atmosféricas, ruido y vibraciones, asociadas al desarrollo de actividades para el cierre minero.
 - Análisis temporales y espaciales de los resultados de los programas de monitoreo y seguimiento de los contaminantes atmosféricos, niveles de presión sonora y vibraciones.
- Cambio climático
 - Escenarios de cambio climático frente al planteamiento de actividades en el cierre minero, escenarios de precipitación, temperatura y aumento del nivel del mar.
- Economía circular
 - Implementación de estrategias encaminadas a buscar la eficiencia de recursos y procesos, reduciendo residuos en los diferentes flujos que se presenten dentro de las actividades del proyecto.
- Paisaje
 - Recuperación paisajística.

- Integración de las áreas recuperadas con el paisaje circundante.
- Creación de áreas que presten servicios ambientales de tipo cultural.
- Biótico
 - Rehabilitación ecológica y funcionalidad del paisaje, asociada al estado de la biodiversidad y servicios ecosistémicos.
 - Restauración ecológica, rehabilitación o recuperación de las áreas intervenidas.
 - Monitoreo del estado de la fauna terrestre e hidrobiota del área de influencia.
- Socio económico
 - Estrategia de comunicación y participación con los grupos de interés (autoridades territoriales, ambientales, asociaciones y comunidades del área de influencia, entre otros).
 - Desarrollo de programas durante la fase de operación, enfocados a implementar nuevas prácticas económicas en la fase de poscierre, evitando la dependencia de la comunidad al proyecto.
 - Reactivación o recuperación de la vocación económica del territorio.
- Riesgo
 - Reducción de la amenaza, la vulnerabilidad y manejo del riesgo para el uso de las áreas posminería.
 - Evaluación de riesgos para las instalaciones remanentes. ([ANLA, 2022](#)):

7.3 Recomendaciones para el desarrollo de la industria de los áridos en Medellín, Colombia

Una vez revisado el panorama de la oferta y demanda de áridos en el área de influencia de la ciudad de Medellín, definida la normativa de la operación extractiva y los aspectos de ruido y aire relacionados con los áridos, y hecha la caracterización regional de las unidades litoestratigráficas para ver su potencialidad como fuente

de áridos, se presentan las siguientes propuestas como ideas preliminares para el desarrollo de los áridos en la región:

El déficit de vivienda y el plan de interconexión vial en el área de influencia de la ciudad de Medellín es una motivación importante para continuar con la adquisición de conocimiento sobre los materiales fuente de áridos para la industria de la construcción. En los próximos cinco a diez años se desarrollarán grandes proyectos de movilidad como la extensión de líneas de Metro, tren de cercanías y pavimentación de vías intermunicipales, que requerirán una gran cantidad de áridos y cuyo costo será cubierto con fondos públicos.

Se plantean a continuación varios aspectos que se podrían desarrollar para colaborar en este proceso:

- Participación académica. Es necesaria la participación de las instituciones universitarias en el conocimiento y desarrollo del sector de los áridos para mejorar su conocimiento y poder buscar el uso adecuado de este recurso natural. La investigación científica en nuevos materiales permitirá implementar mejoras en el hormigón con diversas mezclas enfocadas en nuevos productos y usos. Todos estos dirigidos a un uso racional de los áridos y un mejoramiento del medio ambiente.
- Economía circular. Todos los aspectos relacionados con la economía circular deben implementarse alrededor, también, de la industria de la construcción con el objeto de utilizar los áridos de una manera óptima. Así, el impacto por el uso de los áridos naturales se dará en un sistema de desarrollo sostenible. Entre ellos destacaría el fomento de la producción de áridos reciclados, a partir de los RCD (Residuos de Construcción y Demolición), lo cual pasaría, en primer lugar, por la adecuada gestión de estos últimos (incluyendo la adecuada planificación de las demoliciones) y, a continuación, por el establecimiento de plantas de tratamiento y la aplicación de normativa específica que garantice la calidad de los materiales producidos y su aplicabilidad en obras de construcción.
- El reciclaje. Sin duda, el uso máximo de los áridos y los residuos obtenidos por los cambios urbanísticos, demoliciones y nuevas construcciones es un factor clave para hacer un aprovechamiento óptimo de los recursos naturales tipo áridos para la industria de la construcción. Los gobiernos de los países

han identificado esta oportunidad y han implementado leyes y reglamentaciones que dan indicaciones para avanzar en esta dirección.

- Nuevos materiales. El avance en las tecnologías de elaboración de elementos de construcción implica un conocimiento mayor de las materias primas de los áridos, de tal manera que estos materiales serán más aprovechados en la industria. Las mezclas de nuevas sustancias con los áridos llevan ahora a desarrollar hormigones con unos áridos que impactan positivamente en la infraestructura urbanística y el bienestar de la población (Figura 92). Es conveniente realizar un trabajo conjunto desde las universidades e institutos de investigación con las empresas del sector de la construcción para fortalecer esta investigación.
- Arquitectura y construcción. El cambio de pensamiento de las nuevas generaciones respecto a los tipos de vivienda que los habitantes de ciudades y poblaciones pueden tener constituye una oportunidad para que los arquitectos y edificadores construyan proyectos con nuevas alternativas que involucren áridos naturales y nuevos materiales provenientes de otros elementos.

8. Discusión

La naturaleza variable de las rocas que componen las unidades objeto de esta tesis impide conocer, con sólo unos cuantos datos por unidad, el comportamiento físico y químico de los materiales naturales en la totalidad del área expuesta de cada unidad rocosa. Por lo tanto, se recomienda tomar los resultados de esta tesis como una información general que busca dar una primera idea de la calidad de los materiales rocosos y su distribución geológica, con vistas fundamentalmente al ordenamiento territorial, pero que no pretende entregar unos datos determinantes y definitivos para su aplicación industrial.

El área de influencia de la ciudad de Medellín, llamada Área Metropolitana del Valle de Aburrá, cuenta con varios estudios sobre el tema de los materiales de construcción, especialmente áridos naturales y arcillas estructurales, realizados por universidades, entidades del estado y empresas privadas. Los documentos publicados han abierto el camino para conocer el panorama existente frente al reto del aprovisionamiento de materias primas para la industria de la construcción. Algunos trabajos corresponden al reconocimiento de las canteras y sus características geológicas y otros están encaminados a la ordenación territorial.

Los materiales con potencialidad para ser utilizados como arenas y gravas han sido diferenciados, y preliminarmente caracterizados, en tres grandes grupos así: depósitos no consolidados, depósitos estratificados y yacimientos de macizos rocosos.

Se han hecho varias divisiones combinando las calidades físicas y químicas, de tal forma que se tienen los siguientes tipos de materiales que se muestran en la [Tabla 43](#). Esta clasificación se ha hecho de una manera preliminar, considerando la necesidad de llevar a cabo una caracterización más completa y un muestreo más extenso al realizado en esta tesis.

Los depósitos no consolidados corresponden a materiales aluviales, bien sea de terrazas o de cauces de río, asociados, principalmente, a los ríos Cauca, San Juan y Medellín, particularmente en los sectores de Santa Fe de Antioquia – Sopetrán y Bolombolo – La Pintada y Valle de Aburrá. Otros depósitos de material no consolidado se encuentran asociados a las partes más altas de las cuencas de estos ríos, siendo en ocasiones importantes respecto a su potencial como árido natural. La fabricación de hormigón premezclado y mezclas bituminosas para hormigón asfáltico en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá tiene como fuente principal de áridos con características redondeadas los materiales provenientes de los depósitos aluviales de este sector. Sin embargo, empieza a ser inquietante la competencia

del uso de suelo en donde los terrenos podrían tomar mayor valor como asentamientos para infraestructura industrial en lugar de extracción de materiales.

Tabla 37. Resumen de calidades de los distintos tipos de rocas estudiados.

Rocas	Tipos de materiales	Unidades de roca
Arenas y gravas	Depósitos no consolidados	Depósitos en los sectores de Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, Bolombolo, San Pedro, Belmira, Valle de Aburrá
Arenas	Rocas estratificadas	Formación Amagá y Formación Combia
	Macizos rocosos	Stock de Amagá, Gneis de la Miel, Batolito Antioqueño, Stock de Altavista
Rocas ígneas para áridos de machaqueo	Material satisfactorio – Nocivo álcali – sílice	Rocas hipoabisales porfídicas
	Material Aceptable – Nocivo AS (Álcali – Sílice)	Basaltos de Barroso, Complejo Quebradagrande, Formación Combia
	Material Aceptable – Nocivo PL (Partículas Livianas)	Batolito Antioqueño, Stock de Altavista, Stock de Cambumbia, Diorita de Heliconia, Diorita de Pueblito, Batolito de Santa Fe, Ultramáficas y Dunitas de Medellín
	Material Pobre – Nocivo (PL)	Stock de Amagá
Rocas metamórficas para áridos de machaqueo	Material Pobre – Inofensivo	Gabro de Romeral y Gabro de Hispania.
	Material Aceptable – Nocivo AS-PL	Gneis de Palmitas y las Granulitas y migmatitas de El Retiro.
	Material Pobre – Nocivo PL	Anfibolitas de Medellín y Anfibolitas de Sucre

El conocimiento de nuevas fuentes permite dirigir la atención hacia el aseguramiento en el futuro de estas materias primas para la industria de la construcción.

Otra zona de gran interés la constituye la región localizada al occidente de Medellín, particularmente en la localidad de Santa Fe de Antioquia y todos los municipios asociados como San Jerónimo, Sopetrán, Olaya, Sucre y Liborina, los cuales ocupan un espacio que ha sido conectado con una autopista a Medellín, y por encontrarse en la vía que comunicará las poblaciones del sur del país con la costa colombiana. En los alrededores de Santa Fe de Antioquia – Sopetrán se extienden importantes depósitos de arena y grava cuyo uso, actualmente, compite con la agricultura, ganadería y espacios de recreación y turismo. El desarrollo de la infraestructura vial y edificaciones tiene sus fuentes potenciales en los depósitos asociados a esta zona.

Los ensayos realizados en algunos sitios de los extensos depósitos del Sector de Santa Fe de Antioquia – Sopetrán muestran valores localizados dentro de las especificaciones requeridas por la normativa colombiana para la fabricación de hormigón y para la elaboración de capas de rodadura y hormigón de mezclas bituminosas, conteniendo una granulometría que se ajusta a las curvas granulométricas, valores de peso específico aparente y absorción ajustados a la norma, un bajo desgaste por abrasión según el ensayo de la Máquina de los Ángeles y bajo contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales. Su composición litológica corresponde principalmente a material volcánico que podría ser basalto o andesitas; por lo tanto, es importante realizar ensayos en estos materiales para determinar en conjunto la posibilidad de la reacción álcali-sílice cuando se utilicen para la fabricación de hormigones.

En el sector de Bolombolo, en las desembocaduras del Río San Juan y la Quebrada Sinifaná, se localizan depósitos de arena y grava con buenas especificaciones respecto al material. El desgaste por abrasión es bajo según la Máquina de los Ángeles y el contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales es inferior al máximo permitido, por lo tanto, son considerados que pasa el tamiz número 200, absorción y peso específico aparente como buenos materiales para la fabricación de hormigón y capas de rodadura. La composición litológica de estos materiales corresponde principalmente a material volcánico, tipo basalto y andesita y a pórfidos andesíticos, con formas redondeadas y subredondeadas, principalmente. Se recomienda a los industriales y usuarios de estos materiales hacer la inspección para determinar la potencialidad de la reacción álcali-sílice de estos áridos cuando se utilicen para la fabricación de hormigones.

Algunos depósitos de material aluvial asociados a los ríos Cauca y San Juan, en el sector de Bolombolo, contienen una importante cantidad de material de árido fino (arenas), parte de la cual es extraída y llevada hasta el Área Metropolitana en la ciudad de Medellín donde se emplea como material de mampostería. Las arenas finas de este sector presentan contenidos de partículas livianas superiores al permitido para uso como árido fino en mampostería, lo cual requeriría un procesamiento especial para conseguir su eliminación y posterior empleo. De otro lado, la gradación de estas arenas no cumple las especificaciones para uso en mampostería. Los valores presentados aquí son preliminares, en la medida que hacen referencia a unos cuantos puntos; por lo tanto, se recomienda hacer una mayor caracterización de estos materiales para confirmar o desvirtuar los valores conseguidos.

El sector de San Pedro – Belmira cuenta con varios depósitos, tipo terrazas aluviales, con cantidades importantes de arenas y gravas ubicados a lo largo del Río Chico, que representan la principal fuente de áridos naturales para esta región, con características de material granular redondeado. La composición litológica corresponde casi completamente a material de anfibolita con formas redondeadas y subredondeadas. Los ensayos en una muestra de estos depósitos presentan valores aceptables para las especificaciones de material pasa tamiz 200, peso específico aparente y absorción. El desgaste por abrasión en la máquina de Los Ángeles es aceptable, aunque superior a los demás materiales ensayados en otros aluviones de diferente composición (anfibolita) y su contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable está por debajo del máximo permitido. Sin embargo, debería ser combinado con un material arenoso para poder obtener mortero o pasta en el momento de producir mezclas de hormigón.

En la presente investigación no se alcanzó a muestrear la totalidad de formaciones superficiales y por lo tanto ha quedado una buena cantidad de depósitos de material no consolidado sin caracterizar. Es importante, reiterar el muestreo en detalle y su caracterización tecnológica cuidadosa para valorar estos depósitos de arena y grava y su potencial uso como material de construcción.

Áridos naturales, tipo arena y grava, provenientes de rocas estratificadas y consolidadas, podrían tener como fuente las formaciones Amagá y Combia. La Formación Amagá es una unidad rocosa con una litología amplia que contiene desde conglomerados y arena conglomerática hasta arenas, limos y arcillas. La composición litológica de los materiales con tamaño mayor a arena es bastante rica en material silíceo (cuarzo y chert), lo cual podría tener consideraciones arriesgadas por la posible reacción álcali-sílice de los áridos con el hormigón de cemento portland. Los resultados de los ensayos presentan porcentajes de material que pasan el tamiz No 200 superiores al establecido, las pérdidas en peso en el ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles están en el límite de lo permitido y se alejan de las especificaciones granulométricas. Son resultados negativos para la potencialidad de estas rocas para ser utilizadas como áridos en la elaboración de hormigón, sin embargo, es el resultado en una sola muestra, por lo tanto, es necesario hacer una mayor caracterización a las rocas de la Formación Amagá.

La Formación Combia posee niveles de roca que podría proveer material granular tipo arena y grava en algunos casos. El material está compuesto principalmente por cantos redondeados a subredondeados de rocas porfídicas, areniscas y argilitas en matriz arenosa, con alto contenido de granos finos de cuarzo. Los ensayos en

una muestra indican un ajuste cercano a una franja granulométrica requerida y una distribución de tamaños homogénea, y aunque el porcentaje de material que pasó el tamiz número 200 es superior al permitido, cumplió con los requisitos de desgaste en la máquina de los Ángeles, así como en terrones de arcilla y partículas deleznales. El ensayo álcali-sílice dio un resultado negativo para la reacción, por lo tanto, se podría usar en la producción de hormigón, teniendo en cuenta la limitación del tamaño máximo, que puede impedir el acomodamiento del hormigón en el entramado del refuerzo. De todas maneras, es importante indicar que existen cantos de andesitas, las cuales son rocas con contenidos de sílice amorfa que podría reaccionar con los álcalis del cemento. Una muestra de esta misma formación contenida en la parte volcánica dio positivo para la reacción álcali-sílice. Por lo tanto, se recomienda hacer una mayor caracterización a estos materiales, especialmente para esta reacción y considerar esta situación para emplear los materiales convenientes.

Una fuente de arenas que se emplea en el área de influencia de la ciudad de Medellín es la zona de meteorización de las rocas graníticas. El Batolito Antioqueño, el Stock de Amagá y el Stock de Altavista son cuerpos graníticos – en sentido industrial – que han generado un perfil de meteorización con la consecuente formación de depósitos de arenas. En el caso del Stock de Altavista se ha llegado a explotar todo el nivel meteorizado y actualmente se encuentra en explotación la roca fresca como material para áridos de machaqueo. En general, estas arenas tienen un contenido de partículas livianas, representadas por micas, cercano o superior al permitido para la elaboración de hormigón y como árido en mampostería.

Es de resaltar la importancia que tiene la inspección de los materiales para determinar la posibilidad de reacción positiva del álcali-sílice en el hormigón de cemento portland, debido a que gran parte de los materiales rodados, arenas y gravas, que forman parte de los depósitos no consolidados de los sectores del Valle de Aburrá, Santa Fe de Antioquia – Sopetrán y Bolombolo están constituidos por basaltos y andesitas, y como se ha dicho, éstas últimas rocas pueden ser nocivas debido a esta reacción.

En esta investigación se hicieron ensayos para determinar la potencial reactividad sílice – álcali en varias unidades litoestratigráficas. Este muestreo se hizo de una manera muy regional, esto es, en un número reducido. De todas maneras, se intentó ver de manera preliminar el comportamiento de algunas rocas con susceptibilidad de reacción. Los resultados muestran una reactividad positiva en una muestra de las siguientes unidades: Complejo Quebradagrande (unidad volcánica),

Pórfidos andesíticos hornbléndicos, Basaltos de Barroso y Formación Combia (tobas soldadas). Los resultados fueron negativos para una muestra de las siguientes unidades: Formación Combia (Unidad de conglomerados), Complejo Cajamarca (cuarcitas), Complejo Quebradagrande (unidad volcánica), Pórfidos andesíticos hornbléndicos, Formación Combia (Basaltos) y Neises y Migmatitas del Retiro. Debe ampliarse el muestreo para conseguir caracterizar mejor las unidades respecto a la reactividad álcali-sílice.

9. Conclusiones

La presente investigación sobre los áridos en el área de influencia de la ciudad de Medellín, Colombia ha hecho una caracterización tecnológica de las unidades de roca en los alrededores de Medellín para ser utilizadas en la industria de la construcción.

Se tienen resultados de los ensayos físicos y análisis químicos básicos que han permitido conocer, de manera preliminar, el comportamiento de las rocas fuentes de áridos para la industria de la infraestructura, construcción y edificación en Medellín, Colombia.

La caracterización tecnológica conseguida ha permitido hacer una valoración de la calidad física y química de las rocas al contrastar los resultados físicos y químicos con las especificaciones indicadas en la normativa colombiana para los áridos y su uso en la elaboración de hormigón y morteros.

Se ha elaborado una cartografía de unidades potenciales de arena y gravas para la industria de la construcción, con una caracterización regional preliminar de sus parámetros físicos y químicos, que permite definir la disponibilidad potencial de las fuentes de áridos.

Las fuentes potenciales para árido provenientes de rocas ígneas contienen materiales con calidad física satisfactoria, aceptable y pobre, y con calidad química generalmente nociva por la presencia importante de partículas livianas o por la posibilidad de la reacción álcali-sílice, y algunas con calidad química inofensiva.

Los materiales localizados en depósitos no consolidados, como aluviales y terrazas, muestran buenos resultados en los ensayos físicos y químicos. En las campañas de exploración local, se debe realizar la prueba de reactividad sílice-álcali, especialmente cuando la litología contiene material de cuarzo.

Las rocas estratificadas, como areniscas y conglomerados, pueden utilizarse como materia prima para áridos, con su posterior procesamiento en la planta. Se trata de rocas cuarzosas que no presentaron una reactividad álcali – sílice positiva de forma preliminar, aunque esta situación debe ser tenida en cuenta en la definición local de recursos para entender su comportamiento.

Los macizos arenosos son una fuente de abundante arena debido a sus perfiles de meteorización bien desarrollados. El peso específico cumple con las especificaciones, pero se debe controlar el material de tamiz 200 (ASTM) y las partículas planas y friables.

Las unidades de roca ígnea presentan una variedad de materiales con condiciones buenas, aceptables y malas para ser utilizados como áridos. En general, las rocas intrusivas y las rocas volcánicas muestran buenos resultados físicos (prueba LA) y un adecuado peso específico, pero las rocas que tienen un componente significativo de cuarzo pueden ser reactivas a sílice-álcali.

Las unidades metamórficas tienen un alto potencial para áridos cuando tienen una estructura masiva o de gneis. Estas rocas tienen poco potencial cuando son esquistos debido a la alta presencia de micas y cuarzo deformado.

El análisis hecho para las rocas con potencialidad para ser utilizadas como árido indican que todas las rocas tienen un peso específico entre 2,06 y 2,95 g/cm³, a excepción de muestras de roca de los gabros de Romeral e Hispania, Anfibolitas de Medellín y Sucre, una muestra de los Basaltos de Barroso y las dioritas de Pueblito. Estas rocas podrían ser consideradas como áridos pesados. Los valores de absorción indican que todos los materiales muestreados cumplen con la especificación requerida.

Los valores del desgaste en la máquina de los Ángeles indican valores entre 5 y 20% para todas las rocas volcánicas de Barroso, Quebradagrande y los Pórfidos andesíticos, dioritas de Altavista, Pueblito y Sabanalarga, las rocas ultramáficas duníticas de Medellín, el Gneis de Palmitas y una muestra de la Anfibolita de Medellín. Valores entre 20 y 35% para las rocas del Batolito Antioqueño, el Gabro de Hispania, los Gneises de El Retiro, las cuarcitas del Complejo Cajamarca y las corneanas de este mismo Complejo. Los valores superiores al 40% están representados por la Anfibolita de Medellín, Anfibolita de Sucre y el Stock de Amagá.

Se ha reunido la normativa para el uso de los áridos en el área de influencia de Medellín para la caracterización y uso de los áridos en la industria de la construcción. Es necesario que las autoridades continúen con el debido control y seguimiento para conseguir el cumplimiento de la normativa.

De acuerdo con las estadísticas oficiales, la Unidad de Planeación Minera Energética de Colombia determinó que, en 2025, Medellín demandará 11,9 millones de toneladas de productos áridos, lo que significará una demanda de 3,1 toneladas/habitante.

Se han identificado retos y restricciones relacionados con el proceso de identificación de fuentes de áridos y su uso en los nuevos esquemas de desarrollo sostenible. Además, se han identificado propuestas para el desarrollo de los áridos relacionadas con la participación académica, la inclusión y compromiso con los elementos de

la economía circular para hacer un completo y óptimo uso de los áridos, además, de la necesidad de avanzar en el estudio de nuevos materiales que apoyen la estructura del desarrollo sostenible.

La cartografía temática de los recursos naturales, en este caso de las fuentes de áridos naturales, sirve de herramienta a las autoridades regionales para que hagan una efectiva ordenación del territorio. Conocer la ubicación y valor de los recursos será importante en el momento de decidir el adecuado uso de los suelos.

La demanda de materiales de construcción en Medellín totalizó 8,77 millones de toneladas para 2013, que incluye la continua construcción de sistema de movilidad urbana con Metro y Metro cables (Figuras 86, 87). Desde 2008, la variación promedio en el número de toneladas de materiales enviados a Medellín ha sido del 2% anual, con un consumo de áridos de 2500 kg/habitante (UPME, 2023).

La oferta promedio anual de áridos para vías en el departamento de Antioquia ha sido de 385.595 m³ y su demanda para el plan de mejoramiento de vías del gobierno colombiano en 2023 – 2026 es de 4.390.200. Esto indica que se debe aumentar la disponibilidad de áridos en las canteras del departamento de Antioquia en el área de influencia de Medellín.

La industria de fabricación de áridos para el suministro de la ciudad de Medellín y su área metropolitana ha requerido la localización de nuevas fuentes más alejadas de Medellín. Por esta razón la distancia máxima de las fuentes de áridos a los sitios de las construcciones pasó de 10 km, en 2010, todas ubicadas en el interior del área metropolitana de Medellín, hasta 50 - 70 km en 2024 en las localidades de Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, Amagá y Bolombolo.

Es fundamental en las empresas fabricantes de áridos mantener el cumplimiento de los requerimientos ambientales indicados por las autoridades colombianas para poder tener una industria sostenible tanto con el ambiente como con el esquema financiero. La gran visibilidad de esta industria y su impacto tanto en el paisaje como en el desarrollo de la infraestructura vial y edificación urbana exige mantener estándares elevados para poder continuar con el desarrollo.

Anexos

Anexo 1. Carpeta comprimida con archivos mxd y datos para ser abiertos en ArcGis:

“MMaya_2024_TesisDoc_Anex1.zip”.

Anexo 2. Artículo publicado.

Maya, M.; Parra, J.L.; Calvo, B. (2023). Exploration of Natural Aggregates for a Sustainable Construction Industry in Western Colombia. *Minerals*, 13, 1430. <https://doi.org/10.3390/min13111430>

Referencias

- Albarracín, H.; Rodríguez, G.; Nivia, A., Sepúlveda, Y.; Gómez, J.; Salazar, Z. (2011). Memoria Explicativa del Mapa Geológico de la Plancha; Santa Rosa de Osos, escala 1:100.000. Ingeominas; Volume 131. https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/
- ANLA – Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2022). Guía para la elaboración del plan de cierre y abandono de proyectos mineros. Subdirección de Instrumentos Permisos y Trámites Ambientales. Gobierno de Colombia. Bogotá. https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/proyectos/02_transformacionales/03_nuevo_modelo/Documentos/05-09-2022-anla-guia-de-cierre-abandono-proyectos-mineros.pdf
- ANM – Agencia Nacional de Minería (2023a). Resolución número 1006 de 30 de noviembre de 2023. “Por medio de la cual se determinan los minerales estratégicos para Colombia”. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá.
- ANM – Agencia Nacional de Minería (2023b). Información del sector y estadísticas - Tipo de Regalía y/o Contraprestaciones <https://www.anm.gov.co/?q=regalias-contraprestaciones-economicas>. .
- Arango-Escobar, J.E.; Toro-Toro, L.M.; Moreno-Sánchez, M.; Ruíz-Jiménez, E.C. (2021). Petrografía y evolución tectónica de los esquistos del Complejo Arquía, al occidente de Manizales en el sector de La Manuela, vías Palestina y Chinchiná, Colombia. Boletín De Geol., 43, 63–86. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021003>.
- Área Metropolitana del valle de Aburrá (1999). Manejo Integral de Canteras y Explotaciones Mineras de Materiales Para la Construcción en el Valle de Aburra; Área Metropolitana del valle de Aburrá: Medellín, Colombia.
- Área Metropolitana del valle de Aburrá (2000). Lineamientos para el ordenamiento ambiental de la actividad minera en el Valle de Aburra; Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2023). Compilación Jurídica del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Descargado de Compilación Jurídica del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. <https://alphasig.metropol.gov.co/normograma/>
- Argos (2024). Recuperado el 20 de marzo de 2024. <https://colombia.argos.co/plantas/planta-de-áridos-canteras-de-colombia/>
- Argos (2024b). Recuperado el 20 de marzo de 2024 en [\(25\) Post | LinkedIn](#)

- Arias, J. (1984). Inventario de materiales pétreos para construcción en el Valle de Aburrá. Tesis inédita Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín.
- Asocreto (1998). Técnicas y propiedades del hormigón. Colección básica del hormigón. Tomo I. Instituto del Hormigón. 250.
- ASTM – American Society for Testing Materials (1993). Designation D 2488-93 - Standard practice for description and identification of Soils (Visual-Manual Procedure). 225-234.
- ASTM – American Society for Testing Materials (2016a). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. Philadelphia, USA. ASTM C127-15. DOI: 10.1520/C0127-1
- ASTM – American Society for Testing Materials (2016b). ASTM C289 – Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method) (Withdrawn 2016). Philadelphia, USA. ASTM C289-07. <https://www.astm.org/standards/c289>
- ASTM – American Society for Testing Materials (2018). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. Philadelphia, USA. ASTM C88-99a. DOI: 10.1520/C0088-99
- ASTM – American Society for Testing Materials (2019a). Standard Practice for Sampling Aggregates. Philadelphia, USA. ASTM D75/D75M-19. DOI: 10.1520/D0075_D0075M-1
- ASTM – American Society for Testing Materials (2019b). Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar. Philadelphia, USA. ASTM C144-18. DOI: 10.1520/C0142_C0142M-17R2
- ASTM – American Society for Testing Material (2020a). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Philadelphia, USA. ASTM C136/C136M-19. DOI: 10.1520/C0136_C0136M-1
- ASTM – American Society for Testing Materials (2020b). Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). Philadelphia, USA. ASTM C1567-23. DOI: 10.1520/C1567-23
- ASTM – American Society for Testing Materials (2020c). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. Philadelphia, USA. ASTM D6913/D6913M-17. DOI: 10.1520/D6913_D6913M-1
- ASTM – American Society for Testing Materials (2020d). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in

- the Los Angeles Machine. Philadelphia, USA, 2020. ASTM C535-16. DOI: 10.1520/C0535-1
- ASTM – American Society for Testing Materials (2023a). Standard Specification for Concrete Aggregates. Philadelphia, USA. ASTM C33/C33M-18. DOI: 10.1520/C0033_C0033M-18
- ASTM – American Society for Testing Materials (2023b). Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. Philadelphia, USA. ASTM C40-04 DOI: 10.1520/C0040-04, ASTM C40-04
- ASTM – American Society for Testing Materials (2023c). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. Philadelphia, USA. ASTM C142/C142M-17. DOI: 10.1520/C0142_C0142M-17R2
- ASTM – American Society for Testing Materials (2023d). Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregate (Withdrawn 2023). Philadelphia, USA. ASTM C123/C123M-1.
- Avendaño, C. (1993). Inventario físico ambiental y jurídico de las explotaciones mineras en el municipio de Bello. División Ambiental Municipio de Bello, Antioquia. 65.
- Bernet, M.; Mesa Garcia, J.; Chauvel, C.; Ramírez-Londoño, M.J.; Marín-Cerón, M.I. (2020). Thermochronological, petrographic and geochemical characteristics of the Combia Formation, Amagá basin, Colombia. *J. South Am. Earth Sci.*, 104, 102897. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102897>.
- Botero, L.F., Mejía, A. (1983). Inventario de materiales pétreos para construcción en el Valle de Aburrá. Tesis inédita Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín.
- British Standard (1981). BS 5930 - Code of practice for site investigations (formerly CP 2001), British Standards Institution, London, 147.
- Bustamante, A.; Juliani, C. (2011). Unraveling an antique subduction process from metamorphic basement around Medellín city, Central Cordillera of Colombian Andes. *J. South Am. Earth Sci.*, 32, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.06.005>.
- Calle, B.; González, H.; De La Peña, R.; Escorce, E.; Durango, J. (1980). Mapa Geológico de Colombia; Plancha 166, Jericó. Escala 1: 100,000. INGEOMINAS.
- Cardona, A.; León, S.; Jaramillo, J.S.; Valencia, V.; Zapata, S.; Pardo-Trujillo, A.; Schmitt, A.K.; Mejía, D.; Arenas, J.C. (2020). Cretaceous record from a Mariana– to an Andean–type margin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. In *The Geology of Colombia, Volume 2 - Mesozoic*. Servicio Geológico Colombiano; Gómez, J., Pinilla-Pachon, A.O., Eds.; Publicaciones Geológicas Especiales: Bogotá, Colombia; Volume 36, p. 39. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.10>.

- CENAC - Centro Nacional de Estudios de la Construcción (1977). Diagnóstico del estado económico y tecnológico del subsector áridos pétreos. Bogotá, 117.
- Chica, G. (1998). Evaluación de las explotaciones de material pétreo en el altiplano del oriente antioqueño. Boletín de Vías (Colombia), 26(91): 61-68 .
- Congreso de Colombia (1993). Ley 99 de 1993 - Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>
- Congreso de Colombia (2010). Decreto 2372 de 2010. Por el cual se reglamenta el Decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones. [https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1872443#:~:text=DECRETO%202372%20DE%202010&text=\(julio%202001\)-,por%20el%20cual%20se%20reglamenta%20el%20Decreto%2Dley%202811%20de,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones](https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1872443#:~:text=DECRETO%202372%20DE%202010&text=(julio%202001)-,por%20el%20cual%20se%20reglamenta%20el%20Decreto%2Dley%202811%20de,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones).
- Congreso de Colombia (2023). Ley 2327 de 2023 (Septiembre 13): Por medio de la cual se establece la definición de pasivo ambiental, se fijan lineamientos para su gestión y se dictan otras disposiciones. [https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30049124#:~:text=LEY%202327%20DE%202023&text=\(septiembre%202013\)-,Por%20medio%20de%20la%20cual%20se%20establece%20la%20definici%C3%B3n%20de,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones](https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30049124#:~:text=LEY%202327%20DE%202023&text=(septiembre%202013)-,Por%20medio%20de%20la%20cual%20se%20establece%20la%20definici%C3%B3n%20de,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones).
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2019). En: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/importaciones/importaciones-historicos>
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2022). Estadísticas de Cemento Gris (ECG) agosto 2022. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/Bol_ECG_ago22.pdf
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2023). Actualización general de proyecciones de población y estimaciones demográficas (Post COVID- 19), con base en CNPV- 2018. Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV- 2018
- Dearman, W.R., 1991. Engineering Geological Mapping. Butterworths advanced series in geotechnical engineering. 387.

- De Sena Nola, I.T.; Zuquette, L. (2021). Procedures of engineering geological mapping applied to urban planning in a data-scarce area: Application in southern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.*, 107, 10341.
- Deere, D.U.; Patton, F.D. (1971). Geological factors controlling slope stability in open pit mines. In *Stability in Open Pit Mining*; Browner, C.O., Milligan, V., Eds.; Society of mining Engineers: New York, NY, USA; Volume 242.
- Dunn, J.R. (1991). Chapter 4—Geology and Exploration. In *The Aggregate Handbook*; Barksdale, R.D., Ed.; National Stone Association: Washington, DC, USA; p. 4-2-4-45.
- European Standards (1999). BS 7943:1999. Guide to the interpretation of petrographical examinations for alkali-silica reactivity. <https://www.en-standard.eu/bs-7943-1999-guide-to-the-interpretation-of-petrographical-examinations-for-alkali-silica-reactivity/>
- G.I.A. Geólogos e Ingenieros Asociados, Ltda. (1999). Manejo integral de canteras y explotaciones mineras de materiales para la construcción en el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 2: 294.
- García del Cura, M., Ordóñez Delgado, S., Parra y Alfaro, J.L. y Calvo, B. (2023). Capítulo 2 – Geología y petrología de los áridos. En: *Manual de Áridos para el Siglo XXI*, Editores: López Jimeno, C. y Luaces Frades, C. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos – ANEFA, Madrid.
- García-Casco, A.; Restrepo, J.J.; Correa-Martínez, A.M.; Blanco-Quintero, I.F.; Proenza, J.A.; Weber, M.; Butjosa, L. (2020). The petrologic nature of the “Medellín Dunite” revisited: An algebraic approach and proposal of a new definition of the geological body. In *The Geology of Colombia, Volume 2, Mesozoic*. Servicio Geológico Colombiano; Gómez, J., Pinilla-Pachon, A.O., Eds.; Publicaciones Geológicas Especiales: Bogotá, Colombia; Volume 36, pp. 45–75. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.02>.
- Geological Society of America (1984). Rock color chart. The Rock Color Chart Committee. Boulder, USA.
- Gil, G., Sossa, J., Correa, R., Gómez, J. (2000). Lineamientos para el ordenamiento ambiental de la actividad minera en el Valle de Aburrá. U. Nacional, tesis Facultad de Arquitectura Postgrado en Planeación Urbano Regional. 192.
- Gobierno de Colombia (2024). Tasa de Cambio Representativa del Mercado -Historico. Recuperado el 15 de febrero de 2024 en Datos Abiertos https://www.datos.gov.co/Economia-y-Finanzas/Tasa-de-Cambio-Representativa-del-Mercado-Historico/mcec-87by/about_data

- Gómez, A., Moreno, M. & Pardo, A. (1995). Edad y origen del “Complejo metasedimentario de Aranzazu – Manizales” en los alrededores de Manizales (Departamento de Caldas, Colombia), *Geología Colombiana*, 19, 83-93
- González, C.F., Uribe, J.J. (1985). Inventario de materiales pétreos para la construcción en el Valle de Aburrá. Tesis inédita Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín, 145.
- González, H. (2001). Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Geología, Recursos Minerales y Amenazas Potenciales; Escala 1: 400,000. INGEOMINAS.
- González, H.; Londoño, A. (2002). Diorita de Pueblito, Cordillera Central, Departamento de Antioquia. Catálogo de Unidades litoestratigráficas de Colombia. Cretácico Inferior. INGEOMINAS.
- Guzmán, F., Arranz, J.C., Smoll, L., Collahuazo, L., Calderón, E., Otero, O. y Arceo, F. (2020). Pasivos ambientales Mineros – Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. ASGMI – Asociación de Servicios Geológicos y Mineros Iberoamericanos (2020). Madrid. <https://asgmi.org/wp-content/uploads/2020/06/Manual-Inventario-PAM-y-Anexos.pdf>
- Hernández, M.; Scarr, S.; Daigle, K. (2023). The messy business of sand mining explained. Available online: <https://graphics.reuters.com/GLOBAL-ENVIRONMENT/SAND/yg-dpzekyavw/> (accessed on 10 August 2023).
- ICONTEC (1979). Norma Técnica Colombiana. NTC 1522:1979 – Ensayo para determinar la granulometría por tamizado. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-suelos-ensayo-para-determinar-la-granulometria-por-tamizado-ntc1522-1979.html>
- ICONTEC (1994). Norma Técnica Colombiana, NTC-130 – Método de ensayo para la determinación de partículas livianas en los áridos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-ingenieria-civil-y-arquitectura-metodo-de-ensayo-para-determinacion-de-particulas-livianas-en-los-aridos-ntc130-1994.html>.
- ICONTEC (2000a). Norma Técnica Colombiana NTC 589-2000 – Método de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable en los áridos. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-porcentaje-de-terriones-de-arcilla-y-particulas-deleznable-en-los-aridos-ntc589-2000.html>
- ICONTEC (2000b). Norma Técnica Colombiana NTC 127:2000 – Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto. ICONTEC – Ins-

- tituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-las-impurezas-organicas-en-agregado-fino-para-concreto-ntc127-2000.html>
- ICONTEC (2017). Norma Técnica Colombiana. NTC 6222:2017. Método de ensayo para determinar el potencial de reactividad de los áridos al álcali (método de barras de mortero). ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-potencial-de-reatividad-de-los-áridos-al-alkali-metodo-de-barras-de-mortero-ntc6222-2017.html>
- ICONTEC (2018). Norma Técnica Colombiana NTC 174:2018 – Especificaciones de los áridos para concreto. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-especificaciones-de-los-áridos-para-concreto-ntc174-2018.html>
- ICONTEC (2019a). Norma Técnica Colombiana. NTC 385:2019 – Terminología relativa al concreto y sus áridos. 1999-09-15. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-terminologia-relativa-al-concreto-y-sus-áridos-ntc385-2019.html>
- ICONTEC (2019b). Norma Técnica Colombiana. NTC 98-2019b – Método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μm (no. 200) en áridos minerales. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-determinar-por-lavado-el-material-que-pasa-el-tamiz-75-m-no-200-en-áridos-minerales-ntc78-2019.html>
- ICONTEC (2019c). Norma Técnica Colombiana. NTC 176:2019 – Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-densidad-relativa-gravedad-especifica-y-la-absorcion-del-agregado-grueso-ntc176-2019.html>
- ICONTEC (2019d). Norma Técnica Colombiana NTC 98-2019 – Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de áridos gruesos menor de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-resistencia-al-desgaste-por-abrasion-e-impacto-de-áridos-gruesos-menor-de-375-mm-utilizando-la-maquina-de-los-angeles-ntc98-2019.html>
- ICONTEC (2020). Norma Técnica Colombiana NTC 2240:2020 – Agregado para mortero de mampostería. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certifica-

- ción, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-determinar-por-lavado-el-material-que-pasa-el-tamiz-75-m-no-200-en-áridos-minerales-ntc78-2019.html>
- ICONTEC (2021). Norma Técnica Colombiana NTC 6415:2021. Método de ensayo para la determinación de la reactividad potencial álcali-sílice de combinaciones de materiales cementantes y áridos (método acelerado de la barra de mortero). ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-metodo-de-ensayo-para-la-determinacion-de-la-reatividad-potencial-alkali-silice-de-combinaciones-de-materiales-cementantes-y-áridos-metodo-acelerado-de-la-barra-de-mortero-ntc6415-2021.html>
- ICONTEC (2024a). Tienda Virtual. Recuperado en 15 de enero de 2024 desde <https://tienda.icontec.org/>
- ICONTEC (2024b) Norma Técnica Colombiana NTC 579:2024. Método de ensayo para determinar el efecto de las impurezas orgánicas en los áridos finos sobre la resistencia del mortero. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-efecto-de-las-impurezas-organicas-en-los-áridos-finos-sobre-la-resistencia-del-mortero-ntc579-2024.html>
- Ingham, J.P. (2013). Aggregates, Editor(s): Jeremy P. Ingham, Geomaterials Under the Microscope, Academic Press. Pages 61-74, ISBN 9780124072305, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407230-5.50012-1>
- INVIAS – Instituto Nacional de Vías (2013a). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá D.C, Cundinamarca, Colombia: Ministerio de Transporte - República de Colombia.
- INVIAS – Instituto Nacional de Vías (2013b). INV E230 Sección 200 – Áridos pétreos. Bogotá, Colombia. Descargado en 15 de diciembre de 2023 en https://www.umv.gov.co/sisgestion2019/Documentos/APOYO/GLAB/GLAB-DE-002_V1_Normas__Invia_Seccion__200-13.pdf
- INVIAS – Instituto Nacional de Vías (2023). Análisis de Precios Unitarios (APU) Regionalizados de Referencia. Actualización: 19 de diciembre de 2023. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>
- INVIAS – Instituto Nacional de Vías (2024). Especificaciones técnicas - Actualizadas a 2023. Recuperado de Documentos Técnicos en 15 de enero de 2024 en <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>.
- Krumbein, W.C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*. 11(2):64-72.

- Langer, W & Lindsay, D. (1999). Preliminary Report on deposit models for sand and gravel in the Cache la Poudre River Valley. U.S. Geological Survey, OFR 99-587.
- Langer, W. (2016). Sustainability of aggregates in construction. In: Sustainability of Construction Materials (Second Edition). Editor: Jamal M. Khatib. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Pages 181-207. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02849-3>
- Langer, W.H. & Knepper, D.H. (1995). Geologic Characterization of Natural Aggregate – A Field Geologist’s Guide to Natural Aggregate Resource Assessment. U.S. Geological Survey. OFR 95-582. 32.
- Livesey, P. (2009). BRE Digest 330: Alkali-silica reaction in concrete - the case for revision Part 1. Concrete. Vol.43. Issue Number 6. The Concrete Society. ISSN: 0010-5317. <https://trid.trb.org/view/907306>
- Londoño, J.D., Wolff, M.I. (1986). Características geológicas de los principales materiales explotados para áridos en el Valle de Aburrá. Tesis inédita. Escuela de Ingeniería de Antioquia. 203.
- López-Jimeno, C. y Luaces-Frades, C. (eds.) (2023). Manual de áridos para el siglo XXI. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos - ANEFA. Madrid. <https://www.aridos.org/manual-de-aridos/>
- Madrid-Restrepo, D.C. (2021). Protolith and Metamorphic Conditions of the Metapelites from the Rio Claro Region (Antioquia Department). Bachelor’s Thesis, Universidad EAFIT, Medellín, Columbia.
- Marín-Jaramillo, T. (2018). Análisis de las Especificaciones de Construcción del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVÍAS) y el Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU) frente a los requerimientos explícitos de calidad de los materiales en los métodos de diseño de pavimentos empleados en Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Mataix, C., Gegundez, P., González, M. y Marín J.C. (2023). Cap. 27.: Restauración de explotaciones de áridos. Conceptos generales y nuevas tendencias. En: López-Jimeno, C. y Luaces-Frades, C. (2023). Manual de áridos para el Siglo XXI. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos – ANEFA. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Madrid. https://www.aridos.org/wp-content/uploads/2020/07/AridosSigloXXI_8pags_V8_2.pdf
- Maya, M.; González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Boletín Geológico, 35, 43–57. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol35.2-3.1995.316>.

- Mejía, M.; Álvarez, E.; González, H.; Grosse, E. (1983a). Mapa Geológico de Colombia; Plancha 130, Santa Fe de Antioquia. Escala 1:100,000. INGEOMINAS.
- Mejía, M.; Álvarez, E.; González, H.; Grosse, E. (1983b). Mapa Geológico de Colombia; Plancha 146, Medellín Occidental. Escala 1:100,000. INGEOMINAS.
- Metro de Medellín (2024). Recuperado el 15 de enero de 2024 en Sistema Integrado de Transporte Masivo - <https://www.metrodemedellin.gov.co/usuarios/sistema-integrado/#tranvia>
- Minercol – MI RÍO (2000). Manejo integral de áreas mineras en la cuenca de la quebrada Altavista, Municipio de Medellín. Convenio, Fase I, 116p. https://www.metro-pol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/Informacionrecursohidrico/PMI-Microcuencas/07-Altavista/PMI_ALTAVISTA%20.pdf
- Mincivil (2024). Recuperado en 20 de marzo de 2024 en <https://www.mincivil.com/wp-content/uploads/2020/07/Girardota-4.jpg>
- Nivia, A. (2001). Basaltos de la Unión. Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia. INGEOMINAS, 55.
- Nivia, A., Marriner, G.; Kerr, A. (1996). El Complejo Quebradagrande una posible cuenca marginal intracratónica del Cretácico inferior de la Cordillera Central de los Andes Colombianos. 7 Congreso Colombiano de Geología, Memorias, 3:108-123. Bogotá.
- Nivia, A.; Marriner, G.; Kerr, A.; Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *J. South Am. Earth Sci.*, 21, 423–436. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.002>.
- OECD – Organization for Economic Cooperation and Development (2018). Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences; OECD Publishing: Paris, France. <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>
- Peña, A.F. (2001). Propuesta metodológica para la gestión ambiental de la explotación de ladrilleras y canteras en el Valle de Aburrá. Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín. Tesis Especialización en Gestión ambiental, 142.
- Pereira, C.A. y Ariza, E.D. (2023). Caracterización de pasivos ambientales : caso colombiano. *International Humanities Review*. <https://doi.org/10.37467/revhuman.v19.4923>
- Pettijohn, F.J. (1975). *Sedimentary rocks* (3rd ed.). New York, Harper and Row, 628.
- Ramírez, M.I. (2008). Sostenibilidad de la Explotación de Materiales de Construcción en el Valle de Aburrá; Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia: Medellín, Colombia.

- Ramírez, P. (1989). Informe geológico y caracterización de zonas de explotación. En: Impacto ambiental de la industria extractiva de materiales. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, 18p.
- Restrepo, J.J. (1986). Metamorfismo en el sector norte de la Cordillera Central de Colombia. Informe interno. Universidad Nacional. p. 276.
- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F. (1984). Unidades litológicas en los alrededores de Medellín. Primera conferencia sobre riesgos geológicos del Valle de Aburrá, Medellín, 25 p.
- Ríos-Úsuga, M.A. (2012). Gestión de pasivos ambientales mineros (explotaciones a cielo abierto). Trabajo de Master. Repositorios Universidad de Medellín. Colombia. <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/1157>
- Rodríguez, G.; Arango, M.I. (2013). Formación Barroso: Arco volcánico toleítico y diabasas de San José de Urama: Un prisma acrecionario T-Morb en el segmento norte de la cordillera Occidental de Colombia. In Boletín de Ciencias de la Tierra; Volume 33.
- Rodríguez, G.; González, H.; Zapata, G. (2005). Geología de la Plancha 147, Medellín Oriental, Departamento de Antioquia. Ingeominas.
- Sierra, G.M.; Silva, J.C.; Correa, L.G. (2003). Estratigrafía Secuencial de la Formación Amagá. Boletín de Ciencias de la Tierra. 2003; Volume 15.
- Silva-Tamayo, J.C.; Lara, M.; Salazar-Franco, A.M. (2020). Oligocene—Miocene coal bearing successions of the Amagá Formation, Antioquia, Colombia: Sedimentary environments, stratigraphy, and tectonic implications. In The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene—Neogene. Servicio Geológico Colombiano; Gómez, J., Mateus-Zabala, D., Eds.; Publicaciones Geológicas Especiales: Bogotá, Colombia; Volume 37, pp. 331–353. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.11>.
- Smith, M.R. & Collis, L. (eds.) (1993). Aggregates – Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes: London, Geological Society Engineering, Geology Special Publication No. 9, The Geological Society, 339.
- Tobón, I. (2000). Una mirada geológica a algunas industrias. Trabajo de promoción como profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín. 219p.
- Torres, A.; Simoni, M.U.; Keiding, J.K.; Müller, D.B.; Zu Ermgassen, S.O.S.E.; Liu, J.; Jaeger, J.A.G.; Winter, M.; Lambin, E.F. (2021). Sustainability of the global sand system in the Anthropocene. *One Earth*, 4, 639–650.
- Triturados Peñalisa, 2024. Recuperado en 20 de marzo de 2024 en <https://www.trituradospenalisa.com/wp-content/uploads/2023/02/contac.jpg>
- UNEP – United Nations Environment Programme (2019). Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global sand Resources; GRID-Geneva, United Nations Environment Programme: Geneva, Switzerland.

- UNEP - United Nations Environment Programme (2022). Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis; GRID-Geneva, United Nations Environment Programme: Geneva, Switzerland.
- Universidad Externado de Colombia (2024) - Blog Departamento de Derecho del Medio Ambiente. Recuperado en marzo de 2024: <https://medioambiente.uexternado.edu.co/la-ley-2327-de-2023-en-colombia-refleja-una-disposicion-visionaria-en-el-contexto-internacional/>
- Universidad Nacional de Colombia – Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2017). Estudio de Transporte de Carga en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Contrato CI 0762 de 2017 Suscrito entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. <https://www.metropol.gov.co/movilidad/Documents/Estudio-de-transporte-de-carga-en-el-Area-Metropolitana-del-Valle-de-Aburra.pdf>
- UPME – Unidad de Planeación Minero Energética (2014). Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las Ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero; Contrato No. 19547-004-2013; Bogotá, Colombia
- UPME – Unidad de Planeación Minero Energética (2023). Diagnóstico preliminar del comportamiento de las tendencias en los mercados de materiales de construcción (Gravas, Arenas y Recebos) y minerales no metálicos (Arcillas) en Colombia. UPME, Bogotá. 257 p.
- UPME-UPTC (2015). Elaboración del instrumento de carácter técnico-ambiental que evidencie los diferentes procedimientos y técnicas necesarias para un desarrollo apropiado para la extracción de materiales de arrastre a partir del trabajo conjunto con las autoridades ambientales. Contrato N°005/2014. Bogotá. http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/Instrumento_tecnico_ambiental.pdf
- Weber, M.; Gómez-Tapias, J.; Cardona, A.; Duarte, E.; Pardo-Trujillo, A.; Valencia, V.A. (2015) Geochemistry of the Santa Fe Batholith and Buriticá Tonalite in NW Colombia—Evidence of subduction initiation beneath the Colombian Caribbean Plateau. *J. South Am. Earth Sci.*, 62, 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.04.002>.
- Zapata-Villada, J. P., Ramírez, D. A., Rodríguez, G., Correa-Martínez, A.M., Sabrica, C., Obando, G., Muñoz, J. (2022). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Neis de Palmitas, cordillera Central. Medellín: Servicio Geológico Colombiano

