

**ESTUDIO DE LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES ASOCIADAS A  
PROCESOS MAGMATICO-HIDROTERMALES EN EL SECTOR SAN ANTONIO-  
SAN CELESTINO (MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER, COLOMBIA)**

**JESÚS BERNARDO RUEDA GUTIÉRREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ESTUDIO DE LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES ASOCIADAS A  
PROCESOS MAGMATICO-HIDROTERMALES EN EL SECTOR SAN ANTONIO-  
SAN CELESTINO (MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER, COLOMBIA)**

**JESÚS BERNARDO RUEDA GUTIÉRREZ**

**Trabajo de grado para la obtención del título de GEÓLOGO**

**Director:**

**Ph. D. Luis Carlos Mantilla Figueroa**

**Co-Directores:**

**Ms. Sc. Jesús Hernando Mendoza Forero**

**Ms. Sc. Juan Carlos Molano Méndez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2011**

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi familia quienes me han dado todo el apoyo que he necesitado durante mis años de vida. Para ellos es este proyecto.*

*La manera como se presentan las cosas no es la manera como son; y si las cosas fueran como se presentan la ciencia entera sobraría.*

*Karl Marx (1818 – 1883)*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia al profesor Luis Carlos Mantilla quien puso en mí la confianza para realizar con éxito este trabajo y siempre estuvo acompañándome durante la realización del mismo. De igual modo agradezco al profesor Jesús Hernando Mendoza quien como co-director aportó al proyecto grandes ideas y sugerencias y siempre estuvo dispuesto a colaborar. Muchas gracias a los dos.

A todos mis compañeros y amigos que compartieron conmigo durante este tiempo, en especial a mis compañeras Lizeth, Mónica, Lady, Aura U, Aura T, Nataly y el compañero Dewin con quienes compartí ideas y dudas durante la realización del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>23</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>24</b>
1.1.1. Objetivo General.....	24
1.1.2. Objetivos Específicos.....	24
<b>1.2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
1.2.1. Fase de campo.....	25
1.2.2. Fase de laboratorio.....	26
1.2.2.1. Análisis macroscópico y de microscopía óptica.....	27
1.2.2.2. Difracción de Rayos X.....	28
1.2.2.3. Análisis de química mineral.....	30
1.2.2.4. Análisis químicos.....	31
1.2.2.5. Análisis de Inclusiones Fluidas.....	32
<b>2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>35</b>
2.1. LOCALIZACIÓN.....	35
2.2. VÍAS DE ACCESO.....	36
2.3. FISIOGRAFÍA Y CLIMA.....	36
<b>3. ANTECEDENTES.....</b>	<b>38</b>
3.1. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL.....	38
3.1.1. Tectónica del área.....	41
3.2. ESTUDIOS RELACIONADOS A LAS MINERALIZACIONES...	42
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1. RASGOS MACROSCOPICOS GENERALES DE LAS LITOLOGÍAS PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	48
4.1.1. Rasgos macroscópicos de las litologías en el bloque B.....	50

4.1.2. Rasgos macroscópicos de las litologías en el bloque A.....	55
4.2. ANÁLISIS MINERALÓGICO Y PETROGRÁFICO DE LAS LITOLOGÍAS PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	56
4.2.1. Análisis de las litologías en el bloque B.....	56
4.2.2. Análisis de las litologías en el bloque A.....	79
4.3. RESULTADOS DRX.....	83
4.3.1. Fases cristalinas presentes.....	84
4.4. QUÍMICA MINERAL.....	88
4.4.1. Muestra TGJB-03-17.....	88
4.4.2. Muestra TGJB-03-21.....	92
4.5. ANALISIS QUÍMICOS.....	95
4.5.1. Clasificación química de las rocas (elementos mayores)....	95
4.5.1.1. Clasificación modal y normativa.....	96
4.5.1.2. Clasificación según saturación de sílice y alúmina.....	97
4.5.1.3. Clasificación TAS.....	98
4.5.1.4. Clasificación catiónica.....	99
4.5.2. Elementos menores.....	101
4.5.2.1. Determinación del ambiente tectónico.....	103
4.5.2.2. Metales preciosos.....	103
4.5.3. REE.....	105
4.6. ESTUDIO DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS.....	107
4.6.1. Petrografía de las asociaciones de inclusiones fluidas.....	107
4.6.1.1. Significado geológico de las asociaciones de inclusiones fluidas (AIF).....	148
4.6.2. Resultados microtermométricos.....	150
4.6.2.1. Composición de los fluidos (sistema cristalino, salinidad y densidad).....	151
4.6.2.2. Temperatura y presión de homogenización.....	154

<b>5. DISCUSIÓN.....</b>	<b>161</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>163</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>165</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>166</b>
<b>ANEXOS.</b>	

## LISTA DE TABLAS

	<b>Página.</b>
<b>Tabla 1.</b> Condiciones técnicas del equipo utilizado para DRX.....	<b>29</b>
<b>Tabla 2.</b> Estándares de microsonda para composición. El límite de detección se refiere al valor mínimo bajo el cual la composición no es detectada.....	<b>31</b>
<b>Tabla 3.</b> Datos de calibración del equipo para la microtermometría de las IF.....	<b>34</b>
<b>Tabla 4.</b> Relación de las muestras colectadas y analizadas. LD: lámina delgada; DRX: difracción de rayos X; AQ: análisis químicos; IF: inclusiones fluidas; QM: química mineral.....	<b>49</b>
<b>Tabla 5.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-01.....	<b>58</b>
<b>Tabla 6.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-02.....	<b>60</b>
<b>Tabla 7.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-09.....	<b>65</b>
<b>Tabla 8.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-10.....	<b>67</b>
<b>Tabla 9.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-11.....	<b>69</b>
<b>Tabla 10.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-15.....	<b>71</b>
<b>Tabla 11.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-16.....	<b>73</b>
<b>Tabla 12.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-17....	<b>75</b>
<b>Tabla 13.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-18.....	<b>77</b>
<b>Tabla 14.</b> Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-02-12.....	<b>82</b>
<b>Tabla 15.</b> Muestras analizadas por DRX.....	<b>84</b>
<b>Tabla 16.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-03.....	<b>84</b>
<b>Tabla 17.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-04.....	<b>85</b>
<b>Tabla 18.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-07.....	<b>85</b>
<b>Tabla 19.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-09.....	<b>86</b>
<b>Tabla 20.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-10.....	<b>86</b>
<b>Tabla 21.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-11.....	<b>87</b>
<b>Tabla 22.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-03-15.....	<b>87</b>

<b>Tabla 23.</b> Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-03-18.....	<b>87</b>
<b>Tabla 24.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C1.....	<b>89</b>
<b>Tabla 25.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C3.....	<b>89</b>
<b>Tabla 26.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C6.....	<b>90</b>
<b>Tabla 27.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C7. ....	<b>90</b>
<b>Tabla 28.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C1.....	<b>92</b>
<b>Tabla 29.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C3.....	<b>93</b>
<b>Tabla 30.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C6.....	<b>93</b>
<b>Tabla 31.</b> Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C7.....	<b>94</b>
<b>Tabla 32.</b> Porcentajes en peso de los elementos mayores.....	<b>95</b>
<b>Tabla 33.</b> Composición normativa CIPW.....	<b>96</b>
<b>Tabla 34.</b> Clasificación de las muestra respecto a la cantidad de sílice.....	<b>97</b>
<b>Tabla 35.</b> Clasificación de las muestra respecto a la cantidad de alúmina. (en rojo los valores excesivamente altos para ser graficados).....	<b>98</b>
<b>Tabla 36.</b> Valor de los parámetros R1 y R2. Los demás parámetro no fueron tomados en cuenta debido a los altos valores que dan.....	<b>93</b>
<b>Tabla 37.</b> Abundancia de elementos traza.....	<b>102</b>
<b>Tabla 38.</b> Abundancia de REE. Los datos del condrito usado para la normalización fueron los de Nakamura.....	<b>106</b>
<b>Tabla 39.</b> Temperaturas del punto eutéctico para diferentes sistemas salinos acuosos (a 1 atm). (Tomado y editado de Pitzer, 1995; Poling et al, 2001; Lemmon at a; 2001 y Velasco, 2004).....	<b>152</b>

<b>Tabla 40.</b> Composición y salinidad de las IF. Los valores en rojo corresponden a las salinidades de inclusiones con presencia de sólidos, los valores subrayados corresponden a temperaturas de fusión de hielo por encima de 0°C.....	<b>153</b>
<b>Tabla 41.</b> Temperaturas y presiones mínimas de homogenización.....	<b>158</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página.</b>
<b>Figura 1.</b> Procedimiento a seguir en la fase de laboratorio.....	<b>27</b>
<b>Figura 2.</b> Aspecto general del equipo para la química mineral.....	<b>30</b>
<b>Figura 3.</b> Equipo utilizado en la microtermometría.....	<b>33</b>
<b>Figura 4.</b> Ubicación de la vereda La Baja, municipio de California (Modificado de <a href="http://www.california-santander.gov.co/calendario/sitio.shtml">http://www.california- santander.gov.co/calendario/sitio.shtml</a> y <a href="http://www.california-santander.gov.co/sitio.shtml?apc=m-m2--&amp;x=1814662">http://www.california-santander.gov.co/sitio.shtml?apc=m-m2-- &amp;x=1814662</a> ).....	<b>35</b>
<b>Figura 5.</b> Aspecto geomorfológico del área de estudio (la línea en rojo representa una posible falla).....	<b>37</b>
<b>Figura 6.</b> Esquema estructural de Bucaramanga. En rojo el área que cubre California. (Tomado de <a href="http://geoambientalcatalinanino.blogspot.com">http://geoambientalcatalinanino.blogspot.com</a> ).....	<b>41</b>
<b>Figura 7.</b> Mapa de minas del área de California (Tomado y editado de Ward et al. (1970), Recursos Minerales Departamentos de Santander y Norte de Santander).....	<b>43</b>
<b>Figura 8.</b> Imagen satelital del área de estudio.....	<b>48</b>
<b>Figura 9.</b> Aspecto del núcleo silíceo dentro del plutón.....	<b>51</b>
<b>Figura 10.</b> Aspecto general del afloramiento 1. La escala horizontal no debe ser considerada.....	<b>51</b>
<b>Figura 11.</b> Corte esquemático mostrando las muestras más representativas del área de estudio (estación 1).....	<b>52</b>
<b>Figura 12.</b> Estación 3 con alteración sericitica, paralelo a la vía que de California Conduce a La Baja.....	<b>53</b>
<b>Figura 13.</b> Esquema de litologías halladas en la estación 3.....	<b>54</b>
<b>Figura 14.</b> Aspecto general del afloramiento 2.....	<b>55</b>
<b>Figura 15.</b> Esquema de litologías en la estación 2.....	<b>55</b>
<b>Figura 16.</b> Muestra de mano TBJG-01-01.....	<b>56</b>

<b>Figura 17.</b> Aspecto general de la muestra evidenciando el alto contenido de cuarzo, así como la presencia de sericita y cristales opacos.....	<b>57</b>
<b>Figura 18.</b> Detalle del cuarzo 1 y 2.....	<b>57</b>
<b>Figura 19.</b> Relicto de textura afanítica dentro del plutón.....	<b>59</b>
<b>Figura 20.</b> Aspecto microscópico general de la muestra.....	<b>59</b>
<b>Figura 21.</b> Vena de cuarzo negro dentro de un granitoide de grano muy fino.....	<b>60</b>
<b>Figura 22.</b> Detalle del relicto ígneo. Ampliado se observa la vena de cuarzo de color negro, no solo el cuarzo de color negro se presenta en la vena, sino también en la composición de la roca.....	<b>61</b>
<b>Figura 23.</b> Muestra de mano de vena de solo cuarzo dentro de cuerpo granítico altamente sericitizado.....	<b>62</b>
<b>Figura 24.</b> Cuarzo del núcleo silíceo.....	<b>62</b>
<b>Figura 25.</b> Torbernita dentro del material silíceo del núcleo (TGJB-01-08)...	<b>63</b>
<b>Figura 26.</b> Relicto porfirítico dentro del núcleo silíceo.....	<b>64</b>
<b>Figura 27.</b> Aspecto microscópico general de la muestra. Los cristales amarillos alargados hacen referencia a la alunita.....	<b>64</b>
<b>Figura 28.</b> Granitoide de grano fino ubicado el oeste del núcleo silíceo.....	<b>66</b>
<b>Figura 29.</b> Aspecto general de la muestra. Nótese la alta alteración sericitica.....	<b>66</b>
<b>Figura 30.</b> Granitoide ubicado al este del núcleo silíceo.....	<b>68</b>
<b>Figura 31.</b> Aspecto microscópico general de la muestra.....	<b>68</b>
<b>Figura 32.</b> Muestra de mano de roca granítica ubicada en el segundo afloramiento.....	<b>70</b>
<b>Figura 33.</b> Aspecto general de la muestra. Nótese la ortoclasa siendo alterada a sericita.....	<b>70</b>
<b>Figura 34.</b> Muestra de mano de roca ígnea con una alta silicificación.....	<b>72</b>
<b>Figura 35.</b> Aspecto microscópico general de la muestra.....	<b>72</b>
<b>Figura 36.</b> Detalle de la textura COMB del cuarzo, acompañado de caolinita y el cuarzo 3.....	<b>73</b>

<b>Figura 37.</b> Roca con alto grado de silicificación con vetilleo de cuarzo y piritita (estación 2).....	<b>74</b>
<b>Figura 38.</b> Aspecto microscópico general de la muestra.....	<b>74</b>
<b>Figura 39.</b> Muestra de mano TGJB-03-18.....	<b>75</b>
<b>Figura 40.</b> Aspecto microscópico general de la muestra.....	<b>76</b>
<b>Figura 41.</b> Detalle del cuarzo 1 y 2.....	<b>76</b>
<b>Figura 42.</b> Venas de cuarzo dentro del plutón.....	<b>77</b>
<b>Figura 43.</b> Aspecto microscópico general de la muestra.....	<b>78</b>
<b>Figura 44.</b> Detalle del cuarzo tipo 1 y 2.....	<b>78</b>
<b>Figura 45.</b> Muestra alterada con presencia de venas de cuarzo más piritita...	<b>79</b>
<b>Figura 46.</b> Muestra silicificada, con un considerable contenido de calcantita.....	<b>80</b>
<b>Figura 47.</b> Muestra de cuarzo xenomorfo dentro del plutón.....	<b>80</b>
<b>Figura 48.</b> Roca granítica con venas paralelas.....	<b>81</b>
<b>Figura 49.</b> Aspecto microscópico general de la muestra donde se evidencia la alta seritización.....	<b>81</b>
<b>Figura 50.</b> Detalle de las sheet veins o venas paralelas dentro de roca granítica (en rojo se muestra la orientación de las vetillas).....	<b>82</b>
<b>Figura 51.</b> Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis.....	<b>88</b>
<b>Figura 52.</b> Relación del Fe vs S en piritas. Los cristales 1 y 3 provienen de la roca, el 6 y 7 son piritas hospedadas en la vetillas.....	<b>91</b>
<b>Figura 53.</b> Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis.....	<b>92</b>
<b>Figura 54.</b> Relación del Fe vs S en piritas. El cristal 3 proviene de la roca, los demás están hospedados en la vetilla de cuarzo más piritita.....	<b>94</b>
<b>Figura 55.</b> Clasificación modal de las rocas.....	<b>96</b>
<b>Figura 56.</b> Diagrama de saturaciones de alúmina (Maniar y Piccoli, 1989)...	<b>98</b>
<b>Figura 57.</b> Clasificación TAS (Wilson 1989). La clasificación de las rocas a la derecha hace parte de la clasificación modal.....	<b>99</b>

<b>Figura 58.</b> Clasificación de las rocas mediante proporciones catiónicas (Rollinson, 1993).....	<b>100</b>
<b>Figura 59.</b> Distribución de tierras raras.....	<b>102</b>
<b>Figura 60.</b> Diagrama Rb vs (Y+Nb) para ambientes de rocas graníticas (after Pearce <i>et al.</i> , 1984).....	<b>103</b>
<b>Figura 61.</b> Abundancia de Au y Ag.....	<b>104</b>
<b>Figura 62.</b> Abundancia de Ni y Cu.....	<b>105</b>
<b>Figura 63.</b> Abundancia de REE.....	<b>107</b>
<b>Figura 64.</b> Estimación de grado de relleno (f) para inclusiones bifásicas, (tomado de Shepherd <i>et al.</i> , 1985).....	<b>108</b>
<b>Figura 65.</b> Lámina doblemente pulida, con inclusiones distribuidas en toda la muestra.....	<b>109</b>
<b>Figura 66.</b> Cuarzo A con inclusiones tipo II, III y IV.....	<b>110</b>
<b>Figura 67.</b> Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II y III.....	<b>111</b>
<b>Figura 68.</b> Cuarzo C con inclusiones tipo I, II y III.....	<b>112</b>
<b>Figura 69.</b> Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo A. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 3; e y f, AIF 5).....	<b>113</b>
<b>Figura 70.</b> Inclusiones tipos II, III en cuarzo B. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 2; e y f, AIF 3). .....	<b>114</b>
<b>Figura 71.</b> Inclusiones tipos I, II y III en cuarzo C. (a y b, AIF 1; c, AIF 2; d, AIF 3).....	<b>115</b>
<b>Figura 72.</b> Lámina doblemente pulida con inclusiones distribuidas en toda la muestra.....	<b>116</b>
<b>Figura 73.</b> Cuarzo A hospedando inclusiones tipo I, II, III y IV. (nicoses cruzados y nicoses paralelos).....	<b>116</b>
<b>Figura 74.</b> Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II, III y IV. (nicoses cruzados y nicoses paralelos).....	<b>117</b>
<b>Figura 75.</b> Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo A. (a y b, AIF 1; c, AIF 2; d, AIF 4).....	<b>119</b>

<b>Figura 76.</b> Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo B. (a y b, AIF 1; c, AIF 2; d y e, AIF 3; f, AIF 4).....	<b>120</b>
<b>Figura 77.</b> Lámina doblemente pulida con inclusiones en la vetillas de cuarzo.....	<b>121</b>
<b>Figura 78.</b> Cuarzo A con inclusiones tipo II, III, IV y V, y cuarzo B con inclusiones tipo II, III y IV. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>121</b>
<b>Figura 79.</b> Inclusiones tipos II, III, IV y V en cuarzo A. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 2; d, AIF 5; f, AIF 6).....	<b>124</b>
<b>Figura 80.</b> Inclusiones tipos I, II, III y IV en cuarzo B. (a, AIF 1 b y c, AIF 2; d, AIF 3; e, AIF 4; f, AIF 5).....	<b>125</b>
<b>Figura 81.</b> Lamida doblemente pulida (en rojo ubicación de la IF).....	<b>126</b>
<b>Figura 82.</b> Cuarzo A con pocas inclusiones tipo I. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>126</b>
<b>Figura 83.</b> Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II y III. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>127</b>
<b>Figura 84.</b> Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo B. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 2; e y f, AIF 3).....	<b>128</b>
<b>Figura 85.</b> Lámina doblemente pulida. Vetillas de cuarzo dentro de cuerpo granítico rico en cuarzo.....	<b>129</b>
<b>Figura 86.</b> Cuarzo A y B con inclusiones tipo I, II y III. (nicoles cruzados)...	<b>129</b>
<b>Figura 87.</b> Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo A. a) AIF 1; b) AIF y cuarzo B. c) AIF 1; d) AIF 3; e) y f) AIF 3.....	<b>131</b>
<b>Figura 88.</b> Lámina doblemente pulida con inclusiones distribuidas en toda la muestra. ....	<b>132</b>
<b>Figura 89.</b> Cuarzo A con inclusiones tipo I, II, III, IV y V. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>132</b>

<b>Figura 90.</b> Cuarzo B con inclusiones I y II. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>133</b>
<b>Figura 91.</b> Cuarzo C con inclusiones tipo II, III, IV y V. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>134</b>
<b>Figura 92.</b> Inclusiones tipos II, III, IV y V en cuarzo A. a), AIF 1; b) AIF 2; c) AIF 3; d) AIF 4; e) AIF 5 y f) AIF 6).....	<b>135</b>
<b>Figura 93.</b> Inclusiones tipos I, II, IV en cuarzo B (imagen a y b) y C (imagen c a f). a) AIF 1; b) AIF 2; c) AIF 1; d) AIF 2; e) y f) AIF 3).....	<b>136</b>
<b>Figura 94.</b> Lámina doblemente pulida. Inclusiones localizadas en el cuarzo oscuro.....	<b>137</b>
<b>Figura 95.</b> Cuarzo A, B y C, solo el cuarzo A presenta inclusiones tipo I, II y III. .....	<b>137</b>
<b>Figura 96.</b> Inclusiones tipo II y III en cuarzo A. a) y b) AIF 1; c) y d) AIF 2; e) y f) AFI 4.....	<b>139</b>
<b>Figura 97.</b> Lamina doblemente pulidas. Las inclusiones se encontraron en la vena de cuarzo + pirita.....	<b>140</b>
<b>Figura 98.</b> Cuarzo A hospedando inclusiones tipo I, II y IV. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>140</b>
<b>Figura 99.</b> Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II, III y IV. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>141</b>
<b>Figura 100.</b> Cuarzo C hospedando inclusiones tipo II y V. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>142</b>
<b>Figura 101.</b> Cuarzo D con inclusiones tipo I, II, III y V. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).....	<b>143</b>
<b>Figura 102.</b> Inclusiones tipos I, II y III en cuarzo A. a) y b) AIF 1; c) AIF 2; d) AIF 3.....	<b>144</b>
<b>Figura 103.</b> Inclusiones tipos II, III, IV y V en cuarzo B. a) y b) AIF 1; c) y d) AIF 2; e) AIF 3; f) AIF 4.....	<b>145</b>

<b>Figura 104.</b> Inclusiones tipos II y IV en cuarzo C. a), b), c) y d) AIF 1; e) y f) AIF 2.....	<b>146</b>
<b>Figura 105.</b> Inclusiones tipos I, II, III y V en cuarzo D. a) AIF 1; b) AIF 2; c y d) AIF 3; e) AIF 4; f) AIF 5.....	<b>147</b>
<b>Figura 106.</b> Muestra TGJB-03-19, asociación de inclusiones tipo II y III.....	<b>148</b>
<b>Figura 107.</b> Inclusiones secundarias. a) muestra TGJB-03-17. b) muestra TGJB-03-21.....	<b>149</b>
<b>Figura 108.</b> Inclusiones tipo V en cuarzo A. Son raras este tipo de inclusiones ya que a pesar de ser tipo V, presentan dos cristales de halita...	<b>150</b>
<b>Figura 109.</b> Diagramas de isocoras para las inclusiones tipo V representadas por el sistema H <sub>2</sub> O+NaCl. El último número en la nomenclatura de la muestra representa el número de la inclusión.....	<b>156</b>
<b>Figura 110.</b> Triángulos: inclusiones tipo III, círculos: inclusiones tipo II, cuadrados: inclusiones tipo V.....	<b>159</b>
<b>Figura 111.</b> Rangos de homogenización de los tres diferentes tipos de inclusiones medidas en el laboratorio.....	<b>160</b>

## **ANEXOS DIGITALES**

**ANEXO 1.** CATALOGO DE MUESTRAS.

**ANEXO 2.** CATALOGO PETROGRÁFICO DE LAS SECCIONES  
DELGADAS.

**ANEXO 3.** CATALOGO PETROGRÁFICO Y MICROTERMOMÉTRICO DE  
LAS INCLUSIONES FUIDAS.

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES ASOCIADAS A PROCESOS MAGMATICO-HIDROTERMAL EN EL SECTOR SAN ANTONIO-SAN CELESTINO (MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER, COLOMBIA).\*

**AUTOR:** Jesús Bernardo Rueda Gutiérrez. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Inclusiones fluidas, hidrotermal, condensación, sericitica, cuarzo-alunita

### DESCRIPCIÓN

Fueron analizadas rocas ígneas de grano fino a medio con variados grados de alteración tipo sericitica y silicificación, pertenecientes a un plutón ubicado entre los caseríos de San Antonio y San Celestino (vereda La Baja). Dichas alteraciones han transformado la mineralogía de la roca, favoreciendo el crecimiento de sílice y alúmina.

La petrografía de las asociaciones de inclusiones fluidas permitió identificar la coexistencia de inclusiones ricas en líquido y en vapor, así como inclusiones sobresaturadas en sales. Mediante el estudio microtermométrico se logró caracterizar la propiedades físico-químicas de los paleofluidos los cuales registraron una salinidad de entre 1.5 y 17 % wt de NaCl para las inclusiones ricas en vapor y líquido; otro tipo de inclusiones hallado en la zona, donde se observa la presencia de cristales de halita, registraron salinidades de entre 30 y 40 % wt de NaCl. El valor de las temperaturas eutécticas medidas son de -19.5, -24.3 -35.4, -47.1, -50,3 y -61.8 °C mostrando la presencia de iones  $H_2O + Na + MgCl_2 + K + CO_2 + Ca_2 + Na_2CO_3$  en los fluidos. Las temperaturas de homogenización muestran un mínimo de 236°C y un máximo de 399°C para la inclusiones hospedadas en el plutón, igualmente hay evidencia de fluidos más caliente expresados en inclusiones ricas en vapor con temperaturas de homogenización que superan los 450°C.

Una segunda litología de composición silícea localizada dentro del plutón estudiado en uno de los puntos de toma de muestras, mostrándose en superficie como un gran núcleo silíceo, presenta una alteración tipo cuarzo-alunita, evidencia al parecer de un segundo evento hidrotermal posterior al que produjo la alteración sericitica

La petrografía y microtermometría podría sugerir un atrapamiento de las inclusiones bajo un estado de condensación de los paleofluidos, descartando en un principio la ebullición de los mismos basados en las bajas temperaturas de homogenización.

---

\*Trabajo de grado, modalidad investigación

\*\*Facultad de ingenierías físico-química. Escuela de Geología. Director: Ph. D Luis C. Mantilla F. Co-directores: Ms. Sc. Jesús H. Mendoza y Ms. Sc. Juan C. Molano M.

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF HYDROTHERMAL ALTERATIONS RELATED TO MAGMATIC-HYDROTHERMAL IN THE SECTOR SAN ANTONIO - SAN CELESTINO (CALIFORNIA MUNICIPALITY, SANTANDER, COLOMBIA).\*

**AUTHOR:** RUEDA GUTIÉRREZ, Jesús Bernardo \*\*

**KEY WORDS:** Fluid Inclusions, hydrothermal, condensation, sericitic, quartz-alunite

## DESCRIPTION

It was analyzed the igneous rocks of fine to medium grain with varied grades of alteration of sericitic and selification type, belonging to a pluton located between San Antonio Town and San Celestino (La Baja District). These alterations have changed the mineralogy of rock, favoring silica and alumina growing.

Petrography of fluid inclusion associations let identify the coexistence of inclusions rich in liquid and steam, whereas inclusions supersaturated in salts. By means of a microthermometry study it was achieved to characterize the physical-chemical properties of paleofluids which registered salinity between 1.5 and 17%wt of NaCl for inclusions rich in steam and liquid. Another kind of inclusions found in the zone where it was observed the presence of halite crystals, registered salinities between 30 and 40% wt of NaCl. The eutectic temperature values measured are of -19.5, -24.3 -35.4, -47.1, -50,3 y -61.8 °C showing the presence of ions  $H_2O + Na + MgCl_2 + K + CO_2 + Ca_2 + Na_2CO_3$  in the fluids. Homogenization temperatures show a minimum of 236°C and a maximum of 399°C for inclusions in the pluton. Also, there is evidence of hotter fluids expressed in inclusions rich in steam with homogenization temperatures over 450°C

A second lithology of silica composition located in the pluton studied taken from one of the sample zones, showing in surface as a big silica nucleus, presents an alunite-quartz type alteration, it seems an evidence of a second hydrothermal event later that the one which produced the sericitic alteration.

Petrography and microthermometry could suggest inclusions embedded under condensation state of paleofluids, dismissing a boiling principle of the same based on the low homogenization temperatures.

---

\* Graduation Project, Research Modality

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Ph. D Luis C. Mantilla F. Co-directors: Ms. Sc. Jesús H. Mendoza y Ms. Sc. Juan C. Molano M.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los efectos que dejan en las rocas el paso de los fluidos hidrotermales (modificación de la textura y mineralogía de las rocas, concentración de elementos de interés económico), permiten entender las condiciones físico-químicas bajo las cuales tuvieron lugar estos procesos de interacción fluido-roca. Estos estudios, son de una gran ayuda para la geología, entre otros muchos campos, debido a que permiten identificar y conocer la sucesión de eventos que pudieron presentarse en algún momento del pasado geológico en algún sector concreto de la corteza terrestre; y esto a su vez, son los pilares que permiten diseñar nuevas estrategias de exploración mineral en un área determinada.

En el marco del contexto anteriormente mencionado, se realizó el presente estudio en un sector localizado a lo largo de la Quebrada la Baja (Municipio de California, Cordillera Oriental de Colombia), conocido como San Celestino y San Antonio (Ver figura 4) en los cuales ha habido actividad minera para exploración de Au y Ag, fundamentalmente.

El estudio aquí presentado, se desarrolló bajo la modalidad de un proyecto de tesis de pregrado 'Modalidad Investigación', en el marco de las investigaciones geológicas que desarrolla el grupo de investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica (MINPETGEO), adscrito a la Escuela de Geología de la UIS.

La investigación desarrollada en el presente trabajo, se centró principalmente en caracterizar la mineralogía, petrografía, inclusiones fluidas y geoquímica de las vetillas, venas y rocas en general (con y sin alteración hidrotermal), aflorantes en el sector objeto de estudio, en aras de establecer los efectos derivados de los procesos magmáticos-hidrotermales que allí tuvieron lugar, y con los cuales se asocia la mineralización de metales preciosos en ese sector.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo General

Estudiar las alteraciones hidrotermales asociadas a los procesos magmatico-hidrotermales que afectaron el sector San Antonio-San Celestino (municipio de California, Departamento de Santander).

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la mineralogía y petrografía de las rocas aflorantes en el sector San Celestino - San Antonio, en aras de definir las variedades litológicas con y sin alteración hidrotermal.
- Identificar la mineralogía neoformada durante los procesos de alteración hidrotermal en el área de estudio, mediante análisis de difracción de rayos X (DRX).
- Realizar análisis de química mineral en sulfuros (mediante microsonda electrónica), en aras de poder establecer posibles variaciones en el contenido de sus elementos trazas.
- Analizar la geoquímica de elementos mayores, menores y trazas, en las rocas con y sin alteración hidrotermal, para establecer variaciones químicas relacionadas con éstos eventos de alteración y; definir posibles rasgos petrogenéticos asociados a las rocas ígneas.

- Realizar análisis petrográficos y microtermométricos en Inclusiones Fluidas, para fines de caracterizar condiciones fisicoquímicas de los paleofluidos hidrotermales.
- Proponer a la luz de los nuevos datos, un modelo de evolución geológica para el sector objeto de estudio, y establecer su relación con el evento mineralizante responsable de la formación de los depósitos de metales preciosos allí presentes.

## **1.2. METODOLOGIA**

Para poder alcanzar los objetivos anteriormente mencionados, se estructuró una metodología de trabajo, la cual consistió en cuatro fases: a) Una fase de campo, previa colección análisis de la información existente; b) Fase de Laboratorio; c) Fase de interpretación de resultados y elaboración del informe del informe final.

Debido a la importancia en la obtención de nuevos datos, a continuación se describen la fase de campo y la fase de laboratorio.

### **1.2.1. Fase de Campo.**

Una visita al área de estudio fue realizada para fines de reconocimiento y muestreo de rocas. Sin embargo, la disponibilidad de muestras y de información de campo, fue mayor a lo colectado durante la visita a campo ya mencionada, gracias al material que el grupo de investigación MINPETGEO disponía en la litoteca de la Escuela de Geología de la UIS, y el cual había sido colectado previamente en el marco de anteriores trabajos de campo, desarrollados durante las prácticas de la asignatura Campo II (asignatura del pensum de la carrera de geología de la UIS).

Un total de 21 muestras de roca; con y sin alteración hidrotermal (evidentes a escala macroscópica), además de venas y vetillas; fueron utilizadas durante el presente estudio.

- **Nomenclatura de las muestra.**

La nomenclatura utilizada para etiquetar cada una de las muestras fue la siguiente: **TGJB-X-Y**

Dónde: **TGJB** es Trabajo de **Grado** de **Jesús Bernardo**.

**X** es el número de la estación.

**Y** es el número de la muestra.

Cada punto de muestreo fue georeferenciado, utilizando para tal un GPS marca GARMIN 60 Csx, utilizando coordenadas del Agustín Codazzi 92334,879 E y 109320,965 N punto de origen Bogotá (ver la lista de muestras estudiadas con coordenadas geográficas X, Y, Z, en el anexo 1).

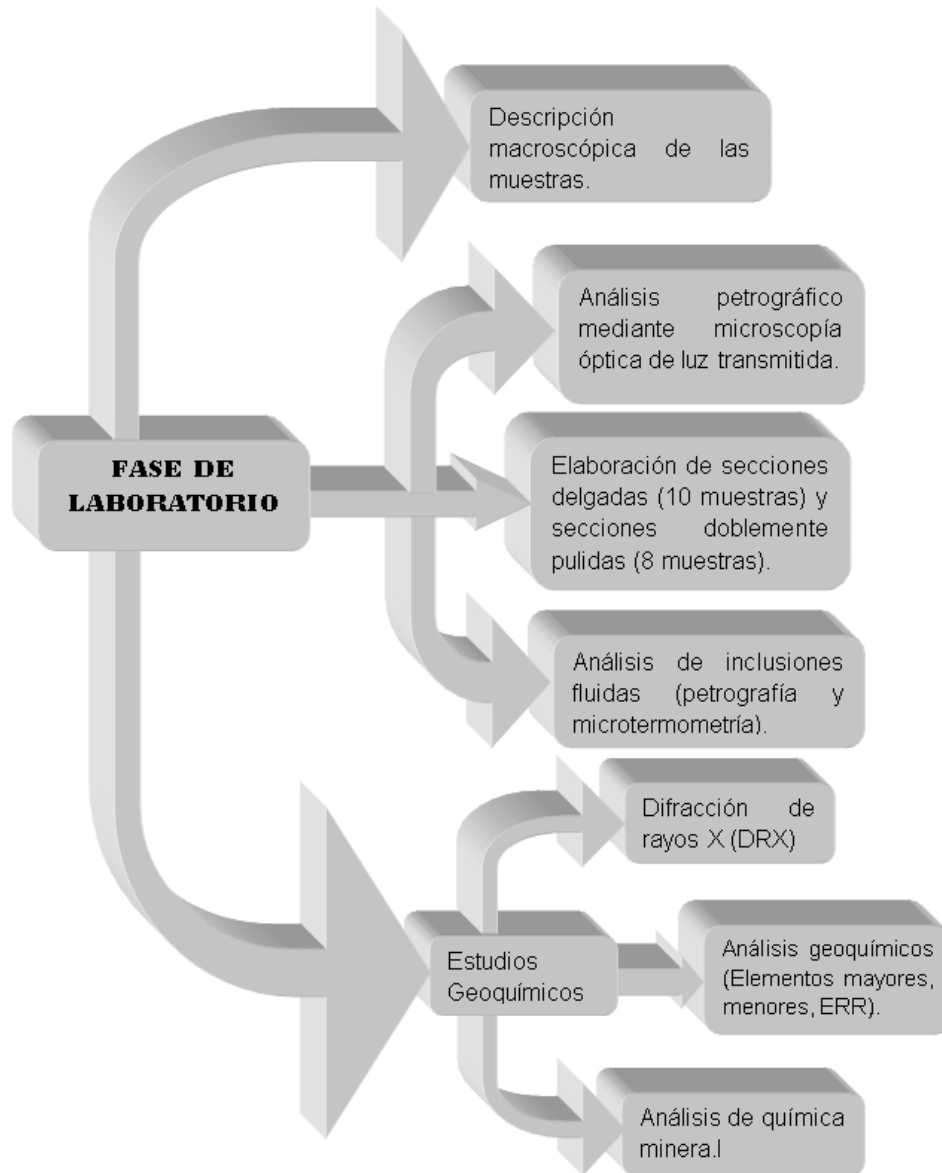
Considerando que las muestras fueron tomadas dentro de un área que no supera los 150 metros de extensión, las variaciones de las coordenadas, evidentemente resultan ser relativamente pequeñas.

Una libreta de campo, un catálogo de muestras, catalogo petrográfico y microtermométrico de las inclusiones fluidas así como un archivo fotográfico de los puntos muestreados, fueron elaborados al final del trabajo de campo (ver anexos 1, 2 y 3).

### **1.2.2. Fase de laboratorio.**

Durante la fase de laboratorio fueron utilizados equipos de la Universidad Industrial de Santander, y de Universidad de California (sede Santa Barbara), así

como la prestación de servicios de la empresa ALS group Laboratory con sede en Bogotá. Los análisis realizados fueron los siguientes (Figura 1).



**Figura 1.** Procedimiento a seguir en la fase de laboratorio.

#### **1.2.2.1. Análisis macroscópico y de microscopía óptica.**

Estos análisis fueron realizados para identificar y caracterizar las fases minerales y los rasgos petrográficos en general, presentes en las muestras estudiadas.

El análisis macroscópico fue realizado en el laboratorio de lupas de la escuela de Geología con lupas de referencia NIKON N1-150 modelo C-PS. El total de las muestras analizadas fueron 21.

Para el análisis microscópico se analizó la petrografía de 11 muestras representativas del área de trabajo, tanto de las rocas con diferentes estados de alteración presentes en el plutón, como de algunas venas. Estas secciones fueron analizadas mediante un microscopio de luz transmitida marca NIKON ECLIPSE E200 50/POL con cámara y pantalla incorporada, en el laboratorio de microscopios de la escuela de geología.

#### **1.2.2.2. Difracción de Rayos X.**

Estos análisis fueron realizados para identificar las fases minerales presentes en las muestras con y sin alteración, especialmente de aquellas fases de granulometrías muy finas, las cuales resultan en ocasiones difíciles definir mediante microscopía óptica.

La preparación de las muestras para el análisis de difracción consistió en triturar cada una de las rocas hasta llegar a la fase más fina ( $75\mu\text{m}$ ); fue necesario utilizar en un principio una trituradora de mandíbula marca RETSCH tipo BB200 y luego llevar el resultado de esa trituración a un mortero de Agatha RM 100 RETSCH y así poder llegar a la fracción más fina. Del resultado de esta trituración se colectaron 10 gramos de cada muestra y posteriormente fueron enviadas al laboratorio de difracción de rayos X de la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestra de aluminio mediante la técnica de llenado frontal. El equipo utilizado fue un

difractómetro de polvo marca PANalytical modelo X'PERT PRO MPD, bajo las siguientes condiciones:

Voltaje	45(kV)
Corriente	40(mA)
Rendijas Soller	0.04 rad (Incidencia y Difracción)
Rendijas Fijas	1/4 y 1/8 (Incidencia) y 1/4 (Difracción)
Muestreo	0.013° 2theta
Rango de Medición	4-70° 2theta
Radiación	CuK $\alpha$ 1
Filtro	Ni
Detector	de estado sólido referencia PIXcel con 255 canales activos
Tipo de barrido	Continuo

**Tabla 1.** Condiciones técnicas del equipo utilizado para DRX

Los resultados (entregados por los técnicos) son tanto cualitativos como cuantitativos y vienen acompañados por su respectivo difractograma. El análisis cualitativo de las fases presentes se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*. El análisis cuantitativo, éste fue hecho mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (*Aluminum oxide, -100mesh, 99%. Corundum,  $\alpha$ -phase. Aldrich No. 23,474-5*) correspondiente al 20%.

### 1.2.2.3. Análisis de química mineral

Se seleccionaron dos muestras para el análisis de química mineral. El estudio fue enfocado en los sulfuros hospedados en la vetillas de cuarzo más piritita y de solo piritita presentes en las rocas del plutón.

El análisis de química mineral se realizó en la Universidad de California (sede Santa Barbara-USA) mediante una microsonda electrónica CAMECA SX100

ajustada con 5 detectores (figura 2). El instrumento usado es totalmente automatizado y manejado mediante el software EPMA v.8.47 (Probe Software, Inc). La resolución espacial para los análisis cuantitativos fue del orden de 1 a 3 micrones y la resolución espacial para las imágenes secundarias y fue de 100 a 200 nm dependiendo del voltaje de aceleración, del haz de luz y de la composición de la muestra.



**Figura 2.** Aspecto general del equipo para la química mineral. (Tomado de <http://www.geol.ucsb.edu/faculty/hacker/probe.html>)

Para el análisis es necesario que la muestra (sección delgada convencional) este muy bien pulida para quitar todas la imperfecciones que puedan interferir con los electrones. Antes del análisis, la muestra es recubierta con una fina película de material conductor (entre los más comunes son carbón, oro y aluminio), posteriormente es introducida en la cámara la cual se acondiciona al vacío. Finalmente se calibra el equipo con la corriente del haz y la aceleración del voltaje adecuada, así como disponer de la estandarización del equipo, dependiendo del análisis que se desea realizar. (Tomado de [http://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/EPMA.htm](http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/EPMA.htm))

El equipo fue calibrado con un voltaje de aceleración de 20 kV, un haz de luz de 300 nA con un diámetro de 5  $\mu\text{m}$ . Los estándares usados y límites de detección fueron los siguientes:

Elemento	ESTANDARES USADOS	LIMITE DE DETECCIÓN
S	Esfalerita, Lark Mine, Bingham, Utah. Rayo analizado: $L\alpha$	0,038766
Fe	Metal de Fe, UCSB Pollock Blk. Rayo analizado: $L\alpha$	0,048936
Zn	Metal de Zn, UCSB Pollock STD Rayo analizado: $K\alpha$	0,212313
Cu	Metal de Cu. Rayo analizado: $K\alpha$	0,162191
Pb	Metal de Pb, Pollock UCSB Std Blk Rayo analizado: $L\alpha$	0,54145
As	As en oropimento, UCSB Sulphides glass block. Rayo analizado: $L\alpha$	0,106452
Mo	Metal de Mo, UCSB Pollock Blk. Rayo analizado: $L\alpha$	0,099851

**Tabla 2.** Estándares de microsonda para composición. El límite de detección se refiere al valor mínimo bajo el cual la composición no es detectada.

#### 1.2.2.4. Análisis químicos.

Diferentes análisis químicos se realizaron a un total de 8 muestras representativas del área de estudio. Estos análisis se hicieron con el ánimo de conocer la concentración de elementos mayores, trazas y REE y así poder clasificar las rocas de acuerdo a parámetros ya establecidos, además de establecer las variaciones composicionales entre cada una de las rocas relacionadas con los eventos de alteración.

Estos análisis fueron realizados por la empresa ALS Laboratory Group en la ciudad de Bogotá. La preparación de las muestras comienza con un proceso de partición para poder reducirlas a granos de un tamaño de 6 mm y así poder ser

introducidas en el molino, posteriormente fueron trituradas y pulverizadas llegando a un tamaño de partículas de 75 micrones.

Para el análisis de múltiples elementos la muestra pasó por un proceso de digestión en agua regia (mezcla de ácido nítrico y clorhídrico) hecha a 1 gramo de muestra; en cuanto a los análisis de elementos traza incluyendo REE la muestra se preparó mediante fusión de la misma en borato de litio. Esta técnica a diferencia de la anterior solubiliza la mayoría de los elementos incluyendo los altamente refractarios. Posteriormente el resultado de estas preparaciones se analizó mediante la técnica ICP-MS (espectrómetro de masa con fuente de plasma de acoplamiento inductivo). El análisis de los óxidos (elementos mayores) fue hecho mediante fluorescencia de rayos X, la preparación de la muestra se hizo igualmente con fusión de borato de litio, con excepción del análisis de FeO el cual paso por una digestión acida de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HF.

#### **1.2.2.5. Análisis de Inclusiones Fluidas.**

El análisis tanto petrográfico como microtermométrico se hizo en aras de conocer la distribución de las asociaciones de inclusiones fluidas hospedadas en las rocas, así como conocer las propiedades físico-químicas de los paleofluidos que interactuaron en el área de estudio. La preparación de la muestra es igual a las de la secciones convencional evitando alcanzar altas temperaturas durante el proceso.

El análisis petrográfico se realizó con el mismo equipo utilizado para las secciones delgadas. Posteriormente, para el estudio microtermométrico se acudió a las instalaciones de la sede Guatiguara de la UIS donde se encuentra el equipo apropiado. Este equipo consiste en un microscopio de luz transmitida NIKON Elipse 50i, con cámara incluida y con platina de calentamiento THMS 600 marca LINKAM (figura 3), además del programa necesario para descripción de las inclusiones (Motic Images Advanced 3.2).



**Figura 3.** Equipo utilizado en la microtermometría.

Antes de comenzar cualquier estudio de IF es necesario calibrar el equipo con el que se va a trabajar. Esto es necesario puesto que las temperaturas que registre el equipo pueden ser incorrectas, dando valores o muy altos o muy bajos, lo que haría erróneas temperaturas donde cualquier mínima variación cambiaría el resultado ( $T_e$  y  $T_f$ ). Para hacer dicha corrección se utilizaron 2 muestras sintéticas, una de ellas compuesta de inclusiones de  $H_2O$  y otra con inclusiones de  $H_2O+CO_2$ , luego de comprobar el punto eutéctico y el punto de fusión para cada muestra, los cuales han sido ya previamente establecidos, se procede a graficar y hallar la desviación estándar la cual será utilizada para la corrección de los valores de temperatura que el equipo suministre. La tabla 2 muestra los valores teóricos y los obtenidos en el laboratorio. Como se observa, los datos tanto teóricos como los obtenidos no tienen una diferencia considerable, por lo que una corrección de temperaturas se hace innecesaria.

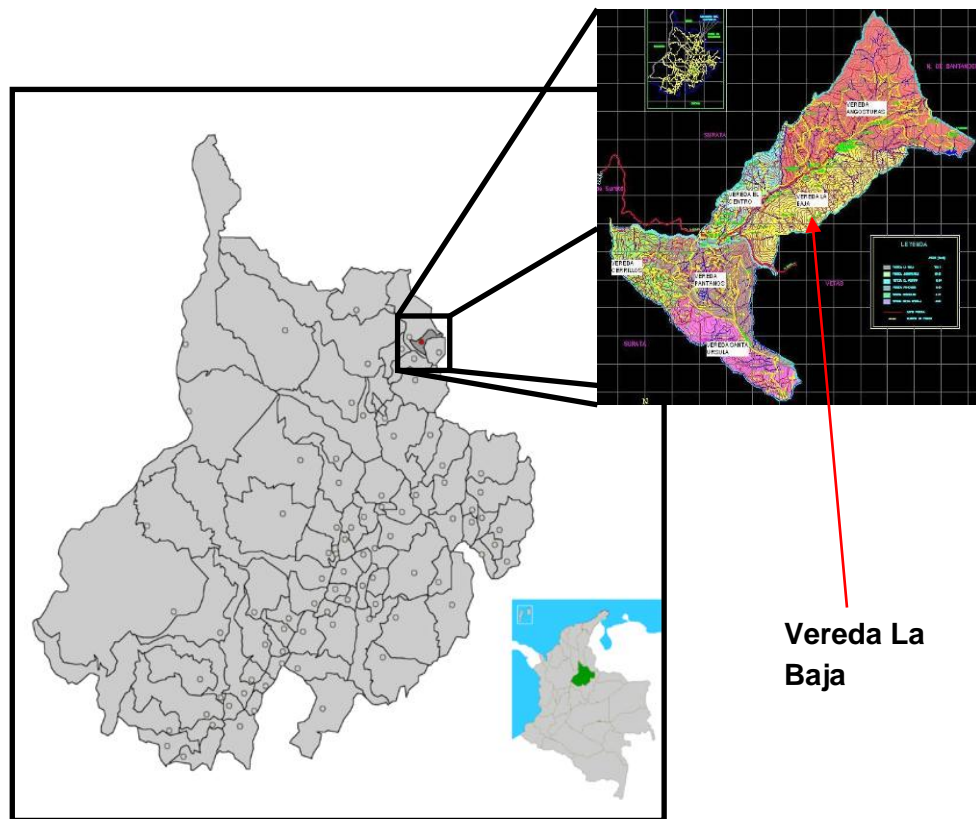
Composición		Valores Teóricos	Valores Obtenidos
H <sub>2</sub> O	Tf	-0.3	0
	Th	374.1	375
H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub>	Te	-56.6	-56.2

**Tabla 3.** Datos de calibración del equipo para la microtermometría de las IF.

## 2. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO

### 2.1. LOCALIZACION

El sector de La Baja se encuentra localizado en el distrito minero de California, Santander ubicado en la Codillera Oriental al NE y a 55 km de la ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander.



**Figura 4.** Ubicación de la vereda La Baja, municipio de California (Modificado de <http://www.california-santander.gov.co/calendario/sitio.shtml> y <http://www.california-santander.gov.co/sitio.shtml?apc=m-m2--&x=1814662>).

La ubicación del sector de estudio se halla exactamente a un costado de la carretera que de California conduce al poblado La Baja, entre el caserío de San

Antonia y San Celestino, el área abarca poco más de 150 m de extensión. Este sector se encuentra aproximadamente a 5 km del Municipio de California el cual limita al Oriente con el Municipio de Vetas, al Norte con el Municipio de Surata y con el departamento de Norte de Santander y al sur con el Municipio Suratá.

## **2.2. VIAS DE ACCESO**

Desde la ciudad de Bucaramanga, capital de Santander, para llegar a la vereda La Baja municipio hay que pasar por los municipios de Matanza, Suratá y California, la vía se encuentra pavimentada 20 km antes de llegar a California, de ahí al área de estudio, la vía es carretable pero sin pavimentar, ubicándose a aproximadamente a unos 30 minutos del casco urbano de California.

## **2.3. FISIOGRAFIA Y CLIMA**

La zona de estudio se encuentra en medio de terreno montañoso, junto a un pronunciado escarpe, producto al parecer de una falla (figura 5). El municipio en general se ubica a una altitud entre 1800 y 3900 msnm, el área específica de estudio se encuentra alrededor de los 2477 msnm, su temperatura promedio es de 17°C con un máximo anual de 25,5°C y un mínimo de 11°C predominando el clima templado a frío. La vegetación es principalmente árboles y plantas de tamaño medio. Su principal corriente de agua es la quebrada La Baja el cual vierte sus aguas en el río Vetas, ésta quebrada es alimentada por distintos afluentes, entre los que se encuentra la quebrada Angostura, Páez entre otros. En cuanto a la precipitación del municipio, se han registrado unos valores totales anuales de entre los 1000 y los 1800 mm. (*Tomado del Plan de Desarrollo de California, 2008*).



**Figura 5.** Aspecto geomorfológico del área de estudio (la línea en rojo representa la falla).

### 3. ANTECEDENTES

Con el propósito de contextualizar la geología del área de estudio, a continuación se resumen aquellos aspectos geológicos relacionados con la geología regional y local, realizados en el marco de estudios geológicos anteriores; así como también lo relacionado con los estudios de la mineralización en metales preciosos.

#### 3.1. GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

En el área general de estudio (California) afloran rocas metamórficas, representadas en el Complejo Neis de Bucaramanga, F. Silgara y Ortoneis; así como variedades de rocas ígneas; pero por su relación con el trabajo, a continuación solo se describen las rocas de la F. neis de Bucaramanga y las rocas ígneas del T-mioceno. Se expondrán los datos más relevantes que muestran estas rocas, presentados en una recopilación hecha del boletín geológico que titula “GEOLOGIA DE LOS CUADRANGULOS H-12 BUCARAMANGA Y H-13 PAMPLONA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER” realizada por Dwight Ward, Richard Goldsmith, Jaime Cruz y Hernán Restrepo en 1973.

- **Rocas metamórficas – (Complejo neis de Bucaramanga)**

El nombre neis de Bucaramanga es propuesto para una secuencia estratificada de rocas meta-sedimentarias de alto grado de metamorfismo que consiste de paraneis pelítico, semipelítico y arenáceo; esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis horblendítico y anfibolita y zonas de migmatitas. Según Ward et al. (1973), la segunda faja del neis de Bucaramanga que él denomina central, se extiende desde el área de Berlín, en la parte norte del H-13 hacia el norte y mas allá de la zona cartografiada y desde el área California-Chachira hasta el área de Morro Nevado, al oeste de Mutiscua.

Según la leyenda del cuadrángulo H-13 el neis de Bucaramanga consiste en paraneis y pocos esquistos, metamorfismo de bajo grado con masas pequeñas de ortoneis. Es en este neis de Bucaramanga donde encajan todas las rocas ígneas y meta-ígneas conocidas, ésta es total o parcialmente la unidad de roca más antigua de la zona, puede reflejar un ciclo de la orogenia del Precámbrico tentativamente colocada alrededor de 940 y 945 m.a.

- **Rocas Ígneas - (Plutón de Paramo rico - cuarzomonzonita, granito, aplita y pórfido cuarzoso - pórfido dacítico - riodacitas).**

En los alrededores del sector de estudio pueden ser encontradas tonalitas y monzogranitos además de intrusivos de edad Jurásica de composición granítica, diorítica, granodiorítica y andesítica. A continuación se exponen los cuerpos ígneos que por su presencia en zonas cercanas a California

El plutón de Paramo Rico hace referencia a tonalitas de color gris de grano medio a grueso y granodioritas, contienen plagioclasas tabular no zonada como levemente zonada; hornblenda, biotita de color marrón, cuarzo intersticial y feldespato potásico en las rocas de grano medio. Como minerales accesorios contiene esfeno, apatito y raramente allanita. Cerca de California ésta tonalita está cortada por cuarzomonzonita, aplita y pórfido cuarzoso, además, pequeñas masas de tonalita néisica se encuentran expuestas en los cortes de la carretera Vetas-Berlín. Se considera que la edad de estas rocas podría estar en el extremo superior del intervalo Silúrico-Triásico.

Las cuarzomonzonita, granito y pórfido cuarzoso de color gris rosado a gris claro están distribuidas en la formación Silgara y Neis de Bucaramanga. Cerca de California se halla un stock compuesto de cuarzomonzonita, aplita y pórfido que presentan semejanzas con fase color rosado pálido de la cuarzomonzonita y granito. El cuerpo principal de roca cerca de California es un granito o

cuarzomonzonita rosado pálido a blanco, de grano fino, con fenocristales de cuarzo bipiramidal. En lámina delgada la roca muestra una textura aplítica con cantidades de oligoclasa y feldespato potásico. Parte o toda esta agrupación se considera de edad Triásica o posiblemente más antigua situándose en el Pérmico.

En el área de California son comunes los pórfidos dacíticos los cuales están cortando rocas del Cretáceo. Éste cuerpo de color gris contiene fenocristales de plagioclasa de hasta de 2 cm y otros más pequeños y escasos de cuarzo y anfíbol. Dicha plagioclasa posee zonación además de estar complejamente maclada. En sección delgada la matriz está compuesta por una mezcla de cuarzo y plagioclasa, con minerales accesorios de esfeno, apatito, óxido de hierro con algo de allanita.

Fueron identificadas y datadas rocas de composición riódacitas, Mantilla et al. (2009). Éstas fueron localizadas en la vereda Hato Viejo (Municipio California), caracterizadas por su color gris y textura fanerítica-afanítica, con fenocristales de plagioclasas, anfíbol y cuarzo. Igualmente en la ladera occidental de la quebrada Móngora (Municipio de Vetas) se hayan cuerpo porfiríticos rosados con fenocristales de cuarzo bipiramidal, plagioclasas, feldespato potásico con algo de biotita. Éste cuerpo porfirítico se halla algo alterado inyectando a cuerpos de cuarzomonzonita en la vía California-Vetas.

Como el área que abarca la zona de estudio no es mayor a 150 m incluyendo los dos afloramientos estudiados, la geología no varía mucho. Se tienen rocas ígneas plutónicas de grano fino a medio de composición ácida. Cada una de ellas presenta alteraciones que varían en su intensidad, la mayoría de rocas son de composición cuarzosa evidenciándose una alta cantidad de sericita como producto de alteración de la ortoclasa. La otra litología dominante en el área es una roca completamente silicificada con cantidades variables de pirita, la variación composicional de esta roca se da en los contactos netos que se observa con el

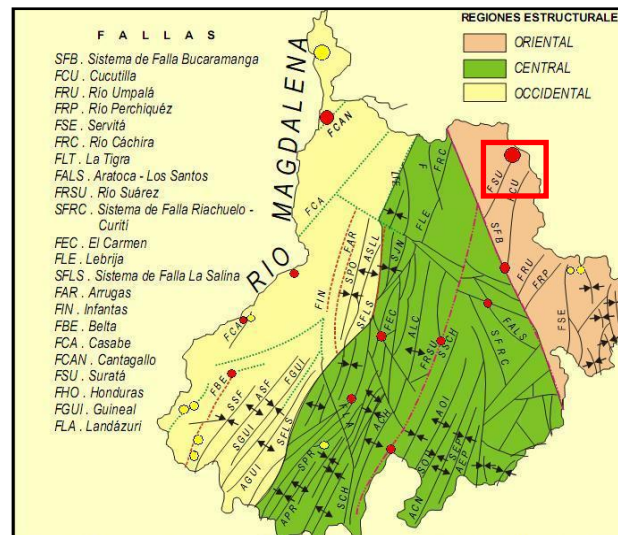
intrusivo, donde se observan unos relictos porfiríticos con fenocristales de color blanco descritos por medio de la petrografía y DRX como alunita.

### 3.1.1. Tectónica del área.

A excepción de pequeñas fallas localizadas, el rasgo estructural más importante y considerable en el área de California es el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta, presentándose como falla de rumbo con un movimiento sinistral y con algunos componentes verticales (Ward et al., 1973).

Otras fallas con rumbo NE han sido identificadas entre las que está el sistema de falla Romeral-Cucutilla y el sistema de La Baja-Angosturas, estos dos haciendo parte del sistema regional de fallas de Boconó (Hornes 2005).

Algunas fallas como las de Cucutilla y Surata de edad Mesozoica fueron reactivadas durante la orogenia Andina formando nuevos sistemas de fallas. También hay evidencias de deformación dúctil con una edad no determinada pero claramente pre-Cretácea (Felder et al, 2000).



**Figura 6.** Esquema estructural de Santander. En rojo el área aproximada que cubre California. (Tomado de <http://geoambientalcatalinanino.blogspot.com>).

Durante la salida de campo, se logró observar una pequeña falla muy local pero que se corta el área de estudio (figura 6). Ésta falla está dividiendo el plutón hallado en la zona ya que la misma litología fue encontrada en los dos bloques, con acepción de un cuerpo silicio solo hallado en el bloque norte.

### **3.2. ESTUDIOS RELACIONADOS A LAS MINERALIZACIONES.**

La exploración de yacimientos en el municipio de California ha tenido un largo historial desde antes de la propia fundación del municipio. Se tienen reportes de excavaciones hechas por los indios Chitareros, ya en 1535 los españoles exploraron las orillas del río Suratá y Paramo Rico fundando así las minas de Montuosa Baja, Montuosa Alta y Vetas de Pamplona. Luego de la creación de California como municipio, se iniciaron labores de exploración por parte de la compañía inglesa Colombian Mining Association en el sector de Montuosa Baja. A inicios del siglo XX (1904 - 1914) la compañía francesa Francia Gold and Silver comenzó trabajos de exploración en el sector; para los años 60's y 80's compañías Anaconda Cooper, Compañía Coreana, Coluranio y Compañía Nipona realizaron investigaciones en el área de California. Ésta última empresa calculó las reservas de oro en el área de San Celestino y San Antonio en unas 46.000 toneladas con tenor de 12 gramos por tonelada y unas 40.400 toneladas de cobre en el sector de San Antonio con un tenor de 1.24%.

Diferentes estudios se han hecho en los alrededores de la zona donde se realizó éste proyecto, con el ánimo de entender y caracterizar las mineralizaciones presentes y que hasta el momento han sido atribuidas a un depósito de alta sulfuración. Aunque la zona que comprende California es de especial interés por las mineralizaciones presentes y su potencial económico, el lugar donde se enfoca este proyecto en especial, presenta características muy interesantes y que por supuesto han de estar relacionadas con los procesos que dieron lugar a dichas mineralizaciones, por lo tanto, los siguientes antecedentes hacen referencia a estudios en el área general que comprende el distrito minero del municipio de



quebrada Angosturas con cantidades menores de covelita y bornita. En las minas La Catalina, La Mascota y San Celestino reportan galena, esfalerita y algo de molibdenita encontrándose igualmente en ésta última mina la presencia de uraninita, meta-autonita y zeunerita.

- Ward *et al.* (1973), realizaron la primera cartografía de las planchas H12 y H13 donde describen las litologías, estructuras, composición y edades tanto de Norte de Santander como de Santander, en ella detallan la geología del Macizo de Santander, sitio donde se encuentra ubicado California, haciendo evidente la alta actividad magmática producida en el área y que pudo generar los fluidos necesarios que interactuaron con la rocas del macizo.
- Mendoza y Jaramillo (1979), en un estudio de geología y geoquímica en el área de California señalan que las concentraciones importantes de oro y plata son de carácter filoniano. Las alteraciones hidrotermales así como la presencia de pequeñas cantidades de otros minerales (Cu, Pb, Zn, Mo) hizo pensar en la relación de las mineralizaciones del área de California con pulsos magmáticos que en superficie se expresan como dique y stocks de roca porfirítica. Demuestran la gran importancia que ejerce el control estructural en las mineralizaciones del área, además de la asociación del oro con los sulfuros pirita y algo de arsenopirita. Fueron igualmente definidas tres zonas de interés (La Angostura, San Antonio y Chorrerón) basados en anomalías de Ag, Ag, Co y Mo ubicados en filones, así como diseminado en la roca caja. De gran importancia fue la asociación que hicieron entre la mineralización de Au con la presencia de elementos como el mercurio, arsénico y antimonio como guía de exploración.
- Polania (1982), relacionó las mineralizaciones de California a fracturas asociadas a la falla La Baja, por donde los paleofluidos migraron y formaron los filones de cuarzo, lo que lo hace llamar a estos depósitos como filonianos epitermales de tipo pechblenda-pirita. Estos filones pudieran estar relacionados

con el núcleo silíceo encontrado en la zona de La Baja, en cuyo interior se encontró cantidades considerables de pirita.

- Pinto (1991), mediante un estudio en la mina la Bodega (California) mostró como resultado de dicho estudio, la posible relación entre los pulsos mineralizantes y la tectónica local y regional del área, además de relacionar las mineralizaciones con alteraciones tipo sericitica y argilica.
- Tawn (2000), realizó un estudio de inclusiones fluidas en el depósito de Angostura. Éste análisis dio como resultado temperaturas de homogenización máxima de los fluidos de 325° C con un promedio de salinidades de 10%wt NaCl indicando densidades del fluido de 0.68 g/cm<sup>3</sup> y presiones mínimas de atrapamiento de 200 bares aproximadamente para las soluciones saturadas en vapor. Además, fue estimada una profundidad de formación bajo condiciones hidrostáticas de por lo menos 2750 metro. También es relacionada la mineralización del depósito con fluidos más profundos que el propio cuerpo intrusivo, de cualquier manera, han catalogado el depósito como de alta sulfuración debido a la profundidad del ambiente de formación en Angostura tal como se han descrito para los depósitos con una profundidad mayor a 1000 metros bajo la capa freática.
- Shaw (2000), atribuye las mineralizaciones del área a actividad magmática del cenozoico, actividad que formó cuerpos porfiríticos dacíticos y andesíticos, produciendo los fluidos necesarios para las mineralizaciones que se transportaron por el sistema de fallas Cucutilla-La Baja.
- Mathur et al. (2003), asociaron la mineralización aurífera en el área de California y Vetas a un pórfido dacítico del Cretáceo superior al Paleógeno, también, mediante dataciones Re-Os en piritas dentro de filones auríferos de las minas La Plata en el municipio de California y El Volcán en el municipio de Vetas, sugieren que la mineralización presente está relacionada con un pulso magmático dacítico con una edad de 57± 10 Ma. Además proponen diferentes

estilos de depósitos para los 2 distritos mineros, de alta sulfuración para California y de baja sulfuración para Vetas.

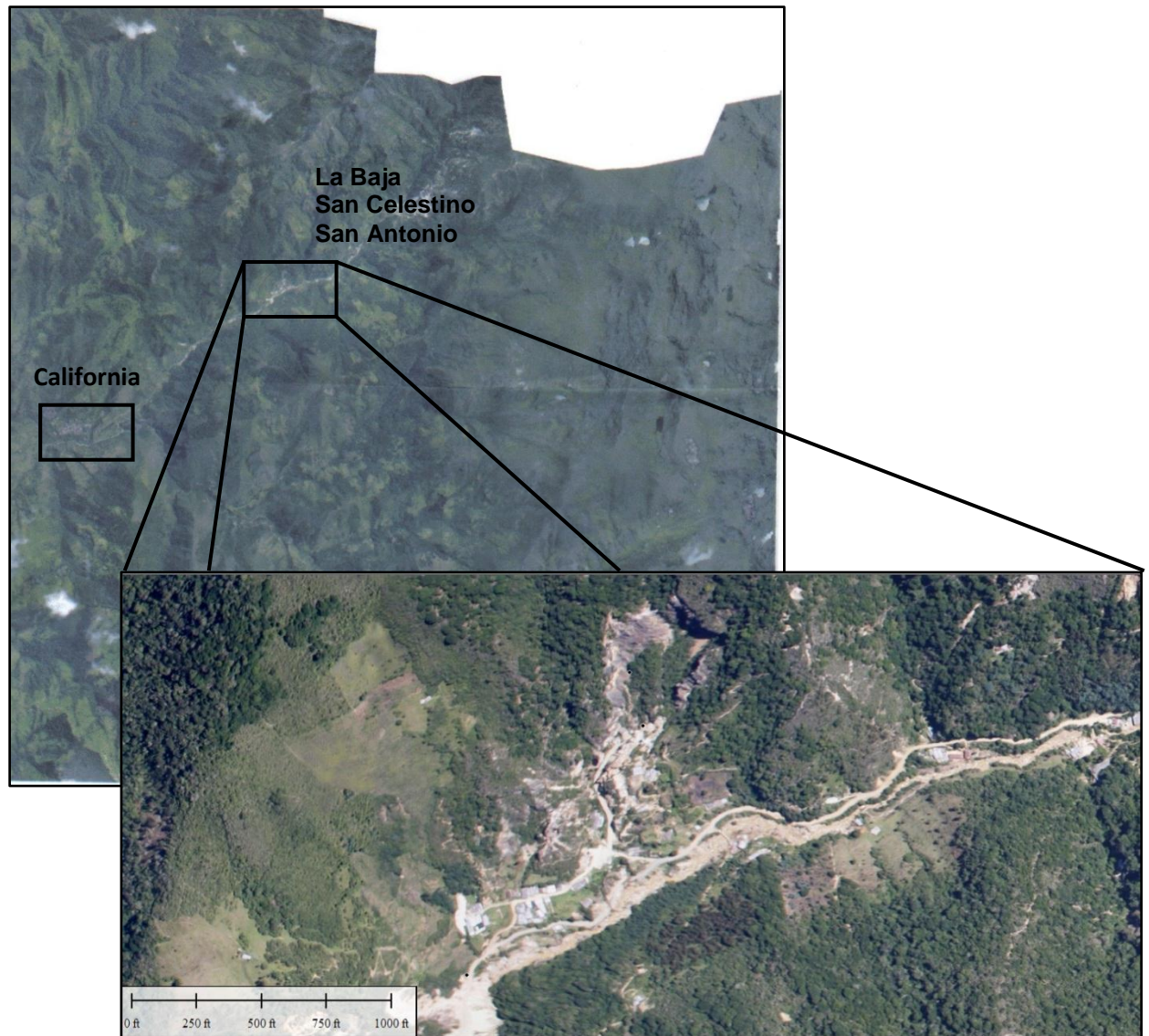
- Diaz y Guerreo (2006), realizaron un estudio de asociaciones minerales en menas auroargentíferas donde establecen la disposición espacial y la genética de la mineralización en el yacimiento Angostura. Concluyen que estas mineralizaciones ocurren en filones de cuarzo con sulfuros y óxidos donde su distribución se da a manera de diseminado y como venas y venillas. Las alteraciones argílica y sericítica parecen ser las que predominan en la zona de California sin ser las únicas, lo que sugiere una alta influencia de minerales plagioclasas.
- Felder et al. (2006), en un informe para la empresa minera Greystar resume las características geológicas y de la mineralización para el depósito de Angostura, identificando alteraciones tipo silicificación, sericitica, piritización, propilítica y alunita, entre otras. Las mineralizaciones son principalmente asociadas a estructura tabulares con silicificación, stockworks con pirita, brechas y zonas de contacto de falla. Advierten que el control estructural juega un papel muy importante ya que la mineralización ocurre en la intersección de venas y fallas. Las alteraciones mencionadas en el informe (silicificación, sericitificación y alunitización) son las que tienen más influencia en el área de estudio en La Baja, lo que podría sugerir que la zona está altamente influenciada por el control estructural que rige en el yacimiento de Angostura.
- Mantilla y otros. (2009), dataron mediante el método U-Pb cuerpos porfíricos pertenecientes al Macizo de Santander, estas edades dieron como resultados edades de  $8.4 \pm 0.2$  y  $9.0 \pm 0.2$  Ma, lo cual evidencia actividad magmática en el Mioceno Tardío (Tortoniano) y que posiblemente tuvo que ver con la formación de sistemas magmáticos – hidrotermales en la zona de California.
- Forero (2010), como resultado de un proyecto de grado en el que se estudió la paragénesis mineral en brechas mineralizadas en el sector de La Mascota,

California, fueron registradas mediante el análisis de inclusiones fluidas, temperaturas de los paleofluidos de 200 a 300 °C.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. RASGOS MACROSCÓPICOS GENERALES DE LAS LITOLOGÍAS PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio (figura 8) tal como se mencionó anteriormente, se localiza en el sector de la Quebrada La Baja (Municipio de California), más específicamente en el sector conocido como San Antonio-San Celestino, en donde ha existido una actividad minera incluso desde la época de la colonia.



**Figura 8.** Imagen satelital del área de estudio.

Un total de 21 muestras fueron colectadas en el sector de estudio, para análisis mineralógico-petrográficos, geoquímicos y microtermométricos (Ver Tabla 4).

ESTACIÓN	MUESTRA	ANÁLISIS REALIZADO	TIPO DE LITOLOGÍA	COORDENADAS XYZ
1	TGJB-01-01	LD-AQ	Ígnea	X=1'306,879 ± 4 m Y= 1'128,272 ± 4 m Z= 2449 msnm
	TGJB-01-02	LD		
	TGJB-01-03	DRX		
	TGJB-01-04	DRX-AQ		
	TGJB-01-05	AQ		
	TGJB-01-06	IF		
	TGJB-01-07	DRX-IF	Núcleo silíceo	
	TGJB-01-08	----		
	TGJB-01-09	LD-AQ-DRX	Ígnea	
	TGJB-01-10	LD-AQ-DRX		
	TGJB-01-11	LD-AQ-DRX		
2	TGJB-02-12	LD-IF	Ígnea	X=1'306,934 ± 10 m Y=1'128,264 ± 10 m Z=2487 msnm
	TGJB-02-13	----		
	TGJB-02-14	IF		
3	TGJB-03-15	LD-AQ-DRX	Ígnea	X= 1'306,588 ± 4 m Y= 1'128,075 ± 4 m Z= 2397 msnm
	TGJB-03-16	LD		
	TGJB-03-17	LD-IF-QM		
	TGJB-03-18	LD-AQ-DRX		
	TGJB-03-19	LD-IF		
	TGJB-03-20	IF		
	TGJB-03-21	IF-QM		

**Tabla 4.** Relación de las muestras colectadas y analizadas. LD: lámina delgada; DRX: difracción de rayos X; AQ: análisis químicos; IF: inclusiones fluidas; QM: química mineral.

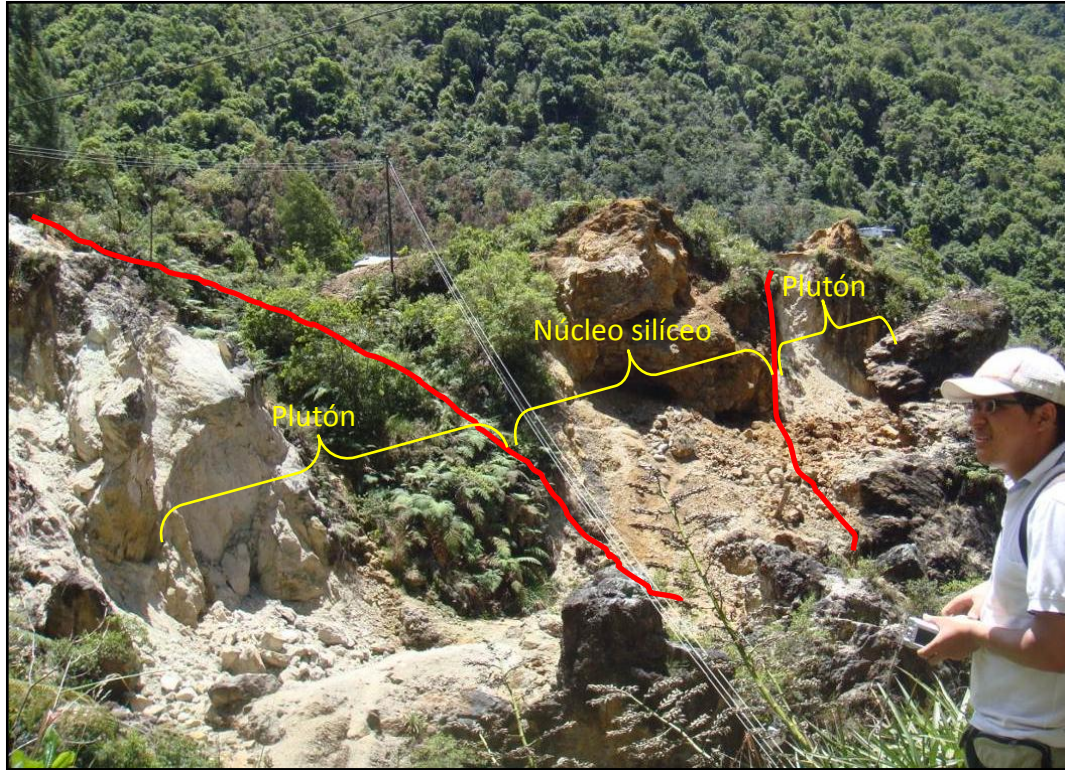
Las observaciones hechas en campo, permitieron reconocer ante todo la presencia de una falla en dirección NE (figura 5), la cual divide la zona escarpada en el bloque A, con presencia de rocas ígneas muy silíceas masivas, comparativamente menos alteradas supergénicamente, de la zona del bloque B, en donde las rocas son ligeramente más alteradas y el relieve es ligeramente menos escarpado. Esta falla, se ha denominado falla Pie de Gallo.

Considerando la presencia de ésta estructura y las ligeras diferencias observadas a lado y lado de la falla, a continuación se describirán los rasgos macroscópicos generales de las variedades litológicas observadas en el bloque B (estación 1 y 3) de la Falla y posteriormente aquellas variedades litológicas reconocidas en el bloque A (estación 2) de ésta.

#### **4.1.1. Rasgos macroscópicos de las litologías en el bloque B.**

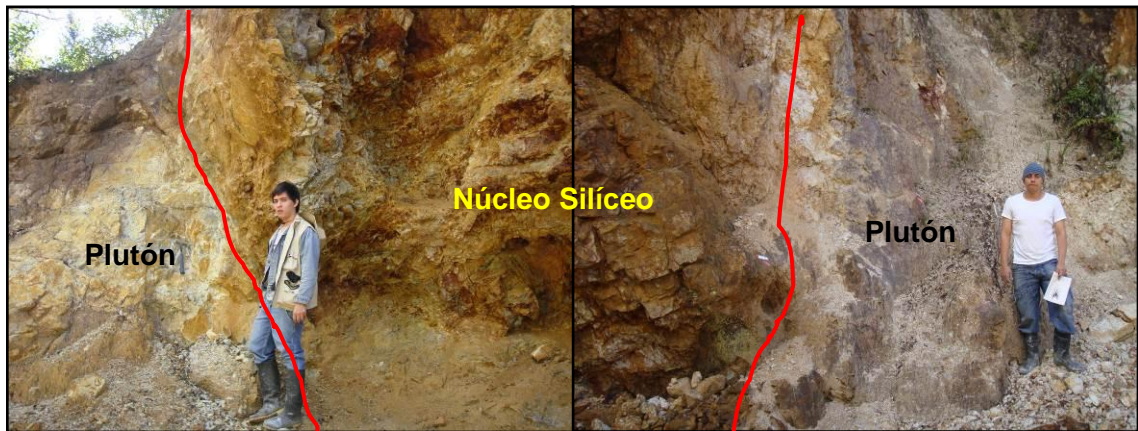
La estación 1 ubicada en el bloque B de la falla consta de rocas ígneas graníticas con diferentes grados de alteración hidrotermal, predominando la alta silicificación y sericitización, las rocas son en su mayoría de grano fino a medio con variedad de venas de cuarzo y algunas otras venillas de pirita; predominan en estas rocas minerales de cuarzo, ortoclasa, sulfuros (en venas), minerales opacos, así como la presencia de sericita como principal alteración y algo de caolinita, sin embargo, éstas propiedades serán detalladas en el análisis microscópico.

Es de especial interés un sector de aproximadamente unos 15 metros de ancho el cual se halla en medio del plutón granítico antes descrito y que parece no tener una clara proyección ni al norte ni al sur. Éste sector es enteramente de un material amorfo silíceo presentando un aspecto marrón, el cual en sus extremos incluye un material de textura porfiritica (figuras 9 y 10), encontrándose en contacto neto con las rocas graníticas de grano medio. Hacia los contactos éste núcleo adquiere tonalidades amarillentas cremosas las cuales gradan a tonalidades más blancas, lo que se puede relacionar inicialmente con una zonalidad mineralógica lateral en donde se pasa de un núcleo silíceo a una zona de alteración cuarzo-alunita. Esta zonalidad mineralógica será posteriormente descrita en detalle aprovechando los datos de mineralogía óptica y de DRX.



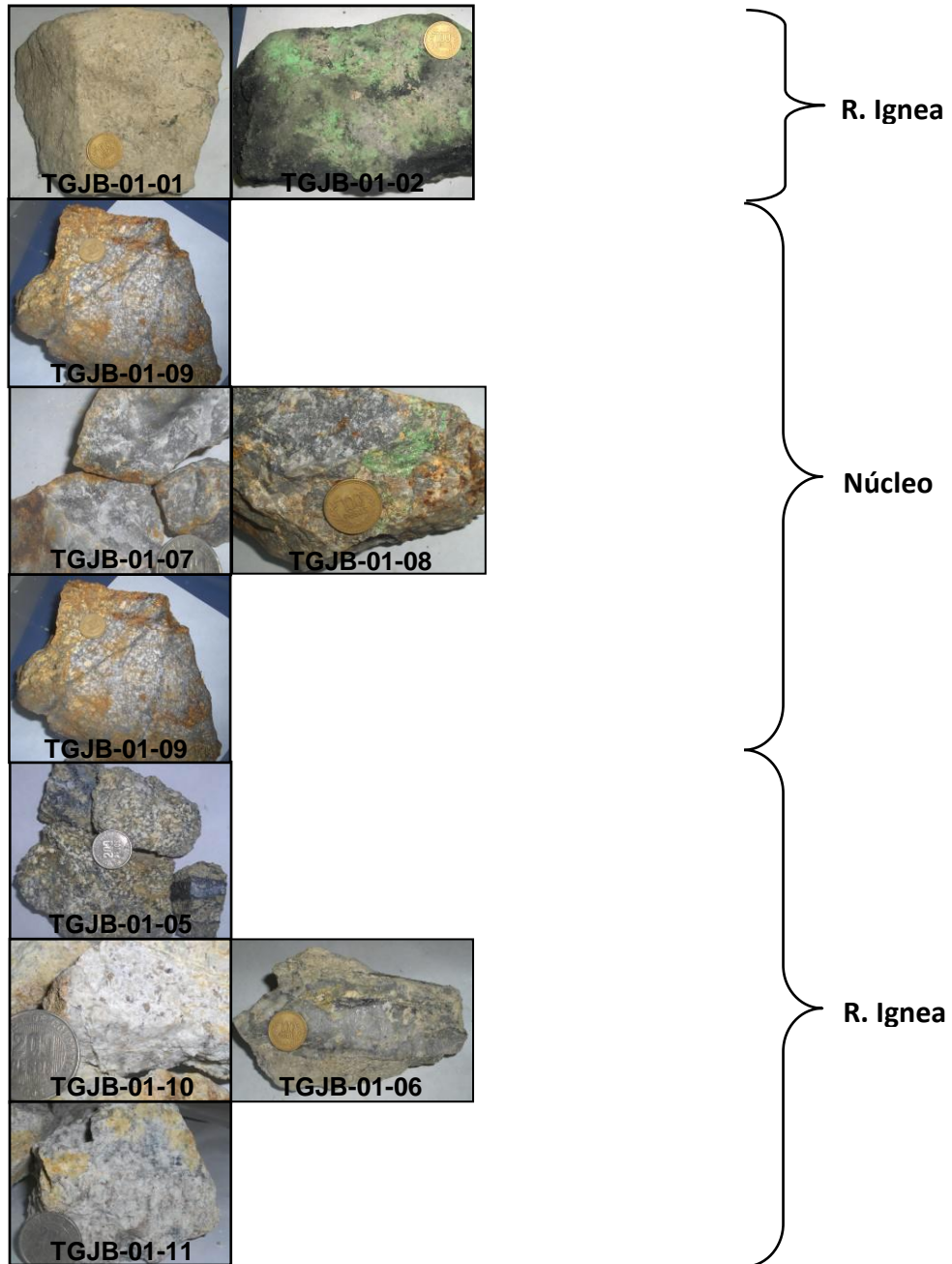
**Figura 9.** Aspecto del núcleo silíceo dentro del plutón.

Estas dos litologías presentan un borde casi neto a los dos lados del sistema (figura 10)



**Figura 10.** Aspecto general del afloramiento 1. La escala horizontal no debe ser considerada.

Haciendo un corte transversal del área del afloramiento 1, se puede observar la siguiente distribución espacial de las muestras.



**Figura 11.** Corte esquemático mostrando las muestras más representativas del área de estudio (estación 1).

Un segundo afloramiento fue también objeto de estudio, este se encuentra a unos 150 metros alejado del anterior punto, pero hace también referencia al material ígneo, el cual hospeda al núcleo silíceo. De aquí fueron extraídas un total de 7 muestras marcadas como TGJB-03-XX.



**Figura 12.** Estación 3 con alteración sericitica, paralelo a la vía que de California Conduce a La Baja.

Además de las litologías predominantes en el área de estudio sus respectivas alteraciones, se analizaron algunos xenolitos encontrados tanto en la estación 1 como en la 3 así como diferentes tipos de venas y venillas.



**Figura 13.** Esquema de litologías halladas en la estación 3.

#### 4.1.2. Rasgos macroscópicos de las litologías en el bloque A.

Desde el punto de vista macroscópico, las litologías graníticas al norte de la falla parecen ser más silíceas, con tamaño de grano medio, más compactas, menos disgregada por procesos de alteración superficial, en comparación con las litologías localizadas en el bloque B. Se destaca la presencia de rocas con cantidades importantes calcantita producto de la alteración supergénica.



Figura 14. Aspecto general del afloramiento 2.



Figura 15. Esquema de litologías en la estación 2.

## 4.2. ANÁLISIS MINERALÓGICO Y PETROGRÁFICO DE LAS LITOLOGÍAS PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Se analizaron un total de 11 láminas delgadas representativas de las tres estaciones (tabla 4). A continuación se detalla la petrografía para cada éstas muestras además de la mineralogía presente en las demás muestras ubicadas en las tres estaciones a lado y lado de la falla.

Se aclara de antemano que las siguientes clasificaciones hacen referencia a la litología actual de la roca, es decir, a la litología resultado de los procesos de alteración mas no es un reflejo de la litología original del area.

### 4.2.1. Análisis de las litologías en el bloque B.

#### TBJG-01-01

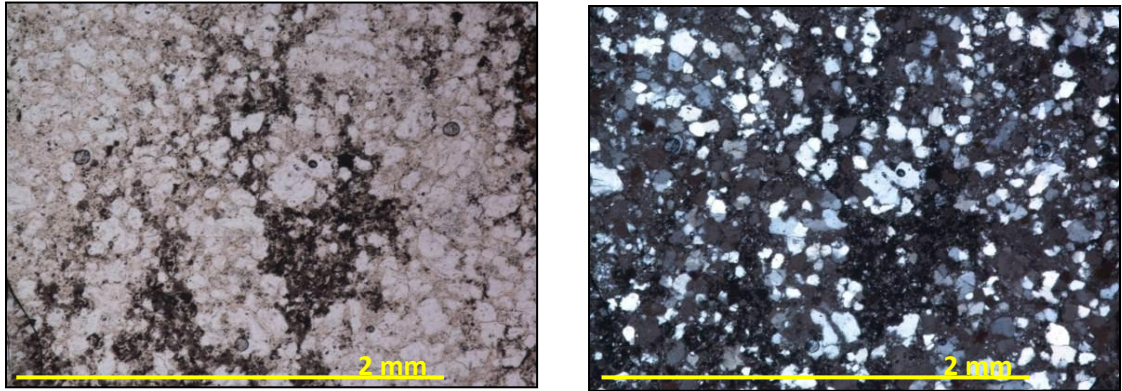
Muestra ígnea con evidencia de alteración sericitica y un pequeño vetilleo de cuarzo.



**Figura 16.** Muestra de mano TBJG-01-01.

- **Petrografía**

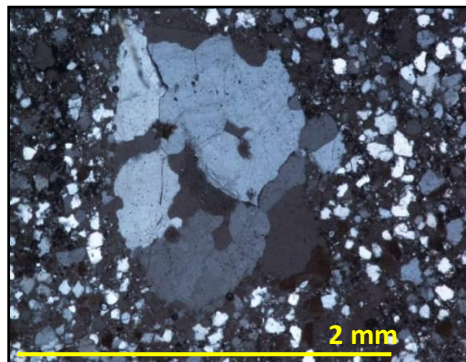
Muestra holocristalina, con tamaños de grano mayormente inequigranular, presenta un alto contenido de cuarzo predominando la textura de mosaico, pero evidenciándose varios tamaños de grano (figura 17).



**Figura 17.** Aspecto general de la muestra evidenciando el alto contenido de cuarzo, así como la presencia de sericita y cristales opacos.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la totalidad de la muestra y se presenta en una textura masiva.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (60%):** se distribuyen en toda la muestra y presenta un tamaño de grano de 0,04 mm a 0,12 mm con formas anhedrales.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (3%):** totalmente anhedrales pero con tamaños mayores que van de 0,52 mm a 0,72 mm, su presencia es muy localizada.



**Figura 18.** Detalle del cuarzo 1 y 2.

**Sericita (23%):** Pequeños cristales incoloros, pero muy brillantes en nicols cruzados, con un relieve de bajo a medio y colores de birrefringencia amarillos de segundo orden, biáxicos.

**Opacos (10%):** Cristales de color negro, anhedrales, con un tamaño de aproximadamente 0,1 mm. Se presentan de manera aislada en toda muestra y en otras partes se da como agregados.

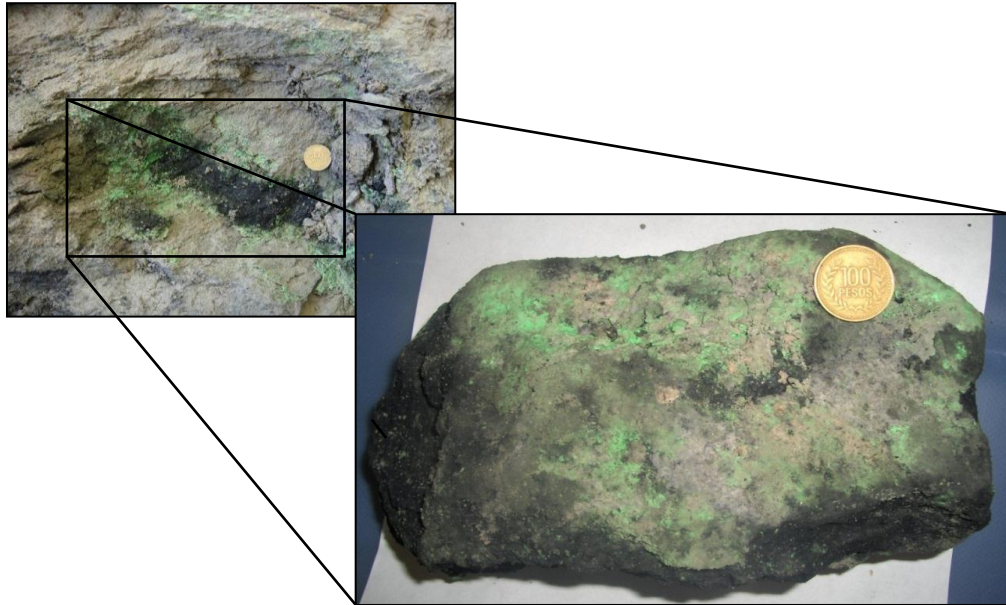
**Zircón (1%):** Cristales incoloros, relieve alto, anhedral, colores de interferencia rosados y azules de tercer orden, uniáxico, con un tamaño 0,4 mm. Es muy escaso y se dan incluidos en otros minerales.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	63	Granitoide rico en cuarzo
Ortoclasa	0	
Plagioclasa	23	

**Tabla 5.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-01.

### TGJB-01-02

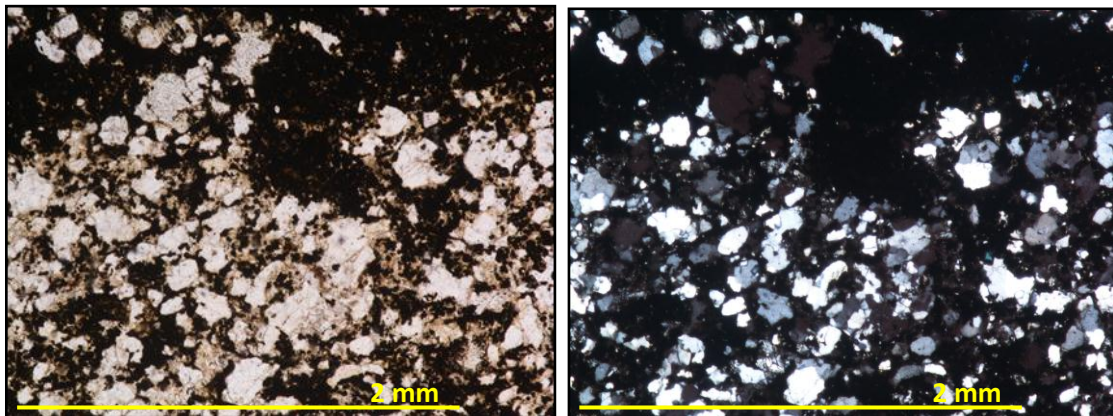
Relicto de color negro muy alterado de grano muy fino. Es llamativo el color verde fosforescente que tiene la muestra, aunque se nota que ha sido bastante alterada por su forma y textura semejante a la arcilla, posiblemente sea material con uranio.



**Figura 19.** Relicto de textura afanítica dentro del plutón.

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular. Aunque aparentemente la muestra presenta poco cuarzo, bajo el microscopio se evidencio lo opuesto, presentando un porcentaje de cuarzo que alcanza poco más del 50 %.



**Figura 20.** Aspecto microscópico general de la muestra.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la totalidad de la muestra.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (50%):** cristales con tamaños que van de 0,1 mm a 0,2 mm.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (1%):** pequeños agregados cristalinos con un tamaño de cristales de alrededor de 0,01 mm. Se disponen en pequeños “lentes” dentro de la muestra.
- **Cuarzo<sub>3</sub> (2%):** grandes cristales dispuestos en venillas con un tamaño de 0,5 mm a 0,6 mm

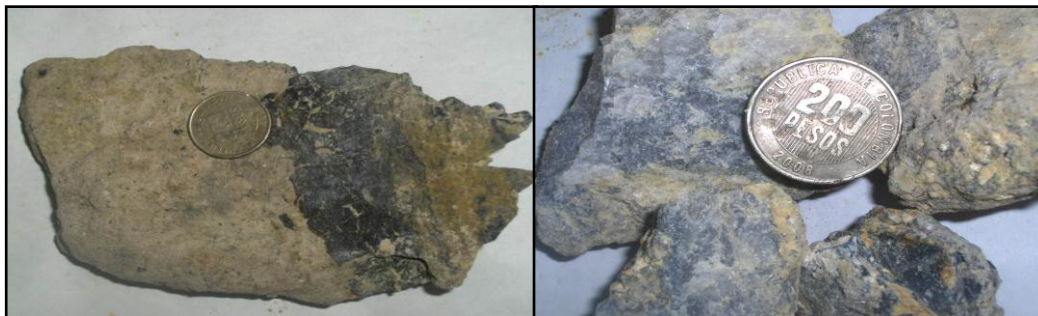
**Material negro (45%):** cristales de color negro (pero no semejantes a cristales opacos). Tienen un aspecto oxidado y están en toda la muestra dándole un aspecto verdoso. Se da como en forma de parches más que de cristales.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	53	Roca muy alterada para clasificar
Ortoclasa	0	
Plagioclasa	0	

**Tabla 6.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-02.

### TGJB-01-03 y TGJB-01-04

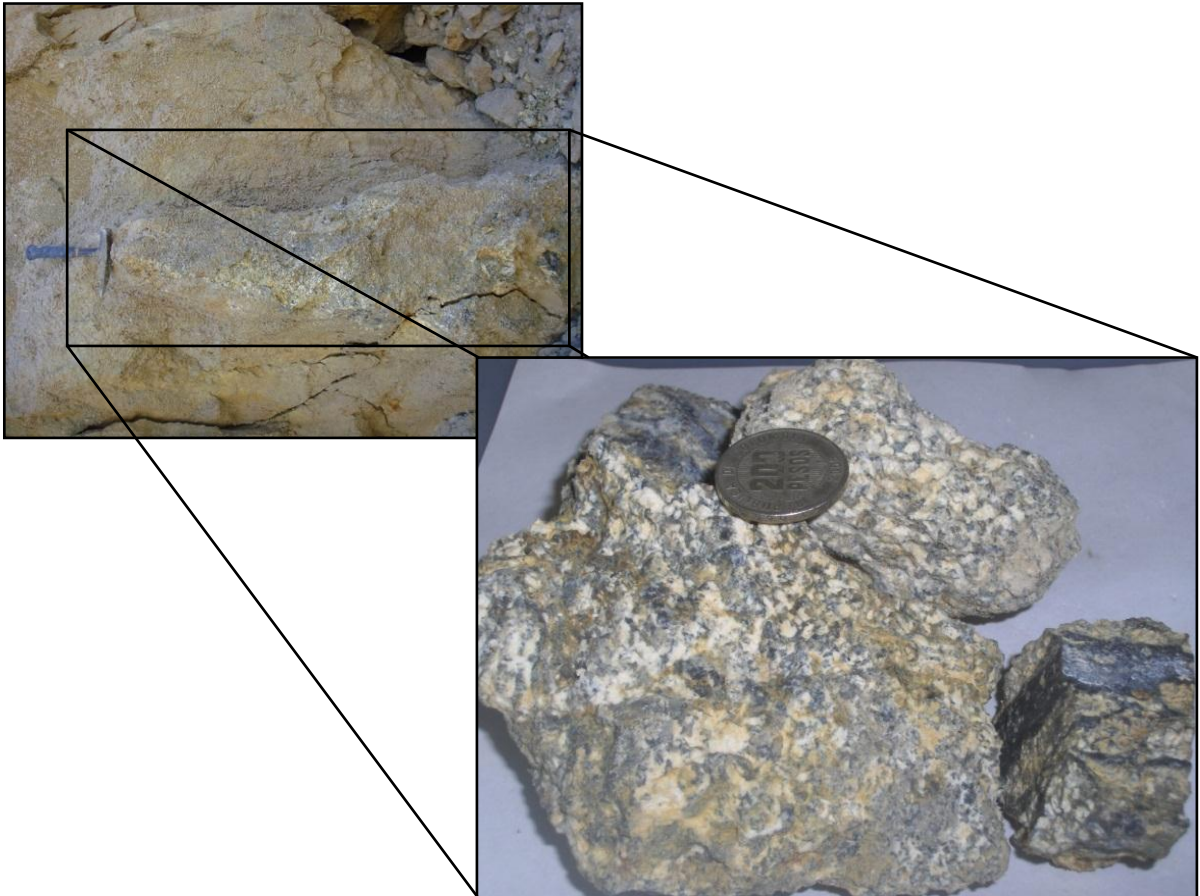
Venas de cuarzo totalmente negro dentro del plutón con evidencia de alteración sericitica.



**Figura 21.** Vena de cuarzo negro dentro de un granitoide de grano muy fino.

### TGJB-01-05

Roca granítica de grano medio con abundante plagioclasa, pero está ya bastante alterada (caolinita o sericita) evidencia de alteración argílica, es notoria la presencia de un cuarzo de un color negro intenso con venas de gran espesor del mismo cuarzo.



**Figura 22.** Detalle del relicto ígneo. Ampliado, se observa la vena de cuarzo de color negro, no solo el cuarzo de color negro se presenta en la vena, sino también en la composición de la roca.

### TGJB-01-06

Vena de cuarzo dentro de roca granítica de grano fino con alteración sericitica.



**Figura 23.** Muestra de mano de vena de solo cuarzo dentro de cuerpo granítico altamente sericitizado.

#### **TGJB-01-07 y TGJB-01-08**

Como parte del sistema, se observa un área de unos 15 metros de ancho de un material silicificado. Esta muestra hace parte de este núcleo donde se observa un cuarzo amorfo de color gris con pequeñas cantidades de pirita.



**Figura 24.** Cuarzo del núcleo silíceo.



**Figura 25.** Torbernita dentro del material silíceo del núcleo (TGJB-01-08).

La torbernita cuya fórmula química es  $\text{Cu}^{2+}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8-10\text{H}_2\text{O}$ , perteneciente al sistema cristalino tetragonal se da como producto de la uranita y la pechblenda como de otros minerales de origen pegmatítico e hidrotermal., posee una dureza baja de 2.5 y se presenta en tonalidades verdosas pero al alterarse por la atmosfera puede tornarse marrón. Se presenta en zonas de oxidación, al ser lixiviado el uranio y cobre de la roca por soluciones oxidantes, éstos se precipitan en forma de torbernita.

#### **TGJB-01-09**

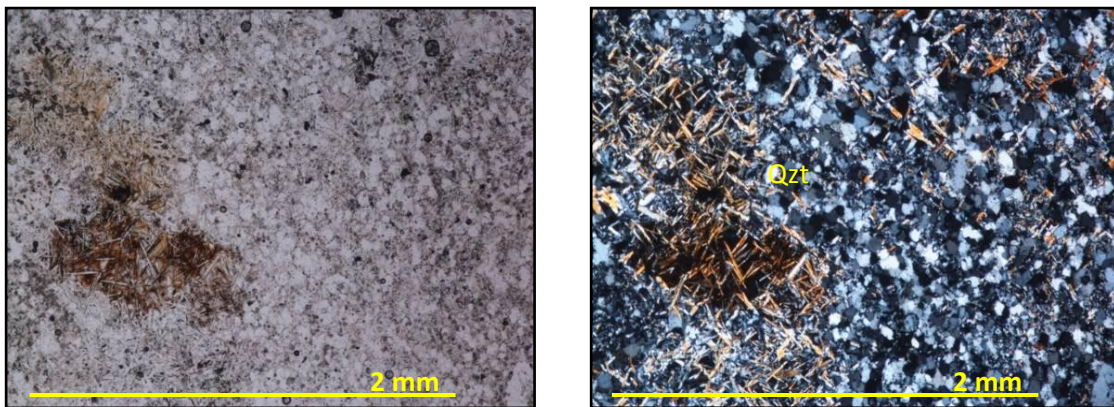
Esta muestra hace referencia a un relicto porfirítico dentro del núcleo silíceo, posee unos fenocristales de lo que en un principio se pensó que era plagioclasas, pero que posteriormente se determinó que se trataba de alunita, dentro de una matriz silicificada, contiene un vetilleo de cuarzo + pirita y de solo pirita.



**Figura 26.** Relicto porfirítico dentro del núcleo silíceo.

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular, presenta alunita asociada al cuarzo. Estos cristales de alunita (amarillos) presentan en ocasiones una tonalidad rojiza asemejando oxidación.



**Figura 27.** Aspecto microscópico general de la muestra. Los cristales amarillos alargados hacen referencia a la alunita.

**Alunita (45%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, euhedrales, de hábito tabular, colores de interferencia amarillos y rojos de primer orden, uniáxico. Tamaño de los cristales de 0,1 mm a 0,26 mm de largo y 0,04 a 0,02 de ancho. Es semejante a la moscovita solo que la birrefringencia es más baja, se da en toda la muestras pero con un ligero cambio de color amarillo fuerte, casi rojo a un amarillo más suave.

**Cuarzo:** Cristales incoloros de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la totalidad de la muestra.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (10%):** grandes cristales con tamaños que van de 0,2 mm a 0,9 mm. Su presencia es muy localizada.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (30%):** cristales con un tamaño de 0,06 mm a 0,2 mm.
- **Cuarzo<sub>3</sub> (5%):** cristales muy pequeños a manera de matriz con un tamaño de 0,01 mm 0,02 mm.

**Caolinita (5%):** Cristales incoloros, anhedrales, con colores de birrefringencia grises de primer orden, biáxico.

**Opacos (4%):** Cristales de color negro, anhedrales. Se encuentra muy localizado, pero se da de manera considerable en ciertas venas de cuarzo.

**Zircón (1%):** Cristales incoloros, relieve alto, anhedral, colores de interferencia rosados y azules de tercer orden, uniáxico, con un tamaño que va de 0,08 mm a 0,1 mm.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	45	Relicto porfirítico
Ortoclasa	0	
Plagioclasa	0	

**Tabla 7.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-09.

### TGJB-01-10

Muestra del pórfido ubicado a al costado oeste del afloramiento. Mediante la petrografía fue posible observar la alta alteración a sericita que presenta la

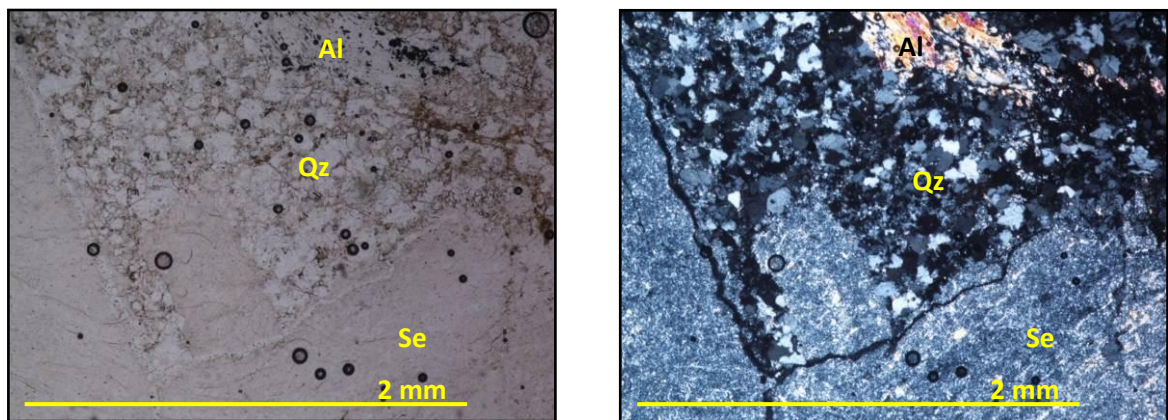
muestra, esta alteración llega a alterar la totalidad de los cristales de lo que parece ser ortoclasa.



**Figura 28.** Granitoide de grano fino ubicado el oeste del núcleo silicio.

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular. El aspecto más importante son los grandes cristales alterados totalmente a sericita, tomados como producto de la alteración de plagioclasa.



**Figura 29.** Aspecto general de la muestra. Nótese la alta alteración sericitica.

**Sericita (45%):** Pequeños cristales incoloros, pero muy brillantes en nicoles cruzados, con un relieve de bajo a medio, colores de birrefringencia amarillos de segundo orden, biáxico y con un tamaño de los cristales de aproximadamente 0.02 mm. Se presentan alterando grandes fenocristales de plagioclasas, con tamaños de hasta 2,5 mm.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la totalidad de la muestra.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (30%):** grandes cristales con tamaños que van de 0,04 mm a 0,36 mm. Se encuentra mayormente rodeado de sericita.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (5%):** cristales con un tamaño de hasta 0,6 mm.

**Ortoclasa (5%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, biáxico. Tiene un tamaño que supera los 3 mm. Estos se observan casi totalmente alterados por la sericita.

**Alunita (5):** Cristales incoloros, de bajo relieve, euhedrales, de hábito tabular, colores de interferencia amarillos de primer orden, uniáxico. Se dan tanto en un habito tabular, semejante a la muscovita como también en agregados, siempre se dan asociados a uno minerales opacos.

**Caolinita (7%):** Cristales incoloros, anhedrales, con colores de birrefringencia grises de primer orden, biáxico.

**Opacos (3%):** Cristales de color negro, anhedrales. Generalmente asociados a la sericita.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	35	Granodiorita
Ortoclasa	5	
Plagioclasa	45	

**Tabla 8.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-10.

### TGJR-01-11

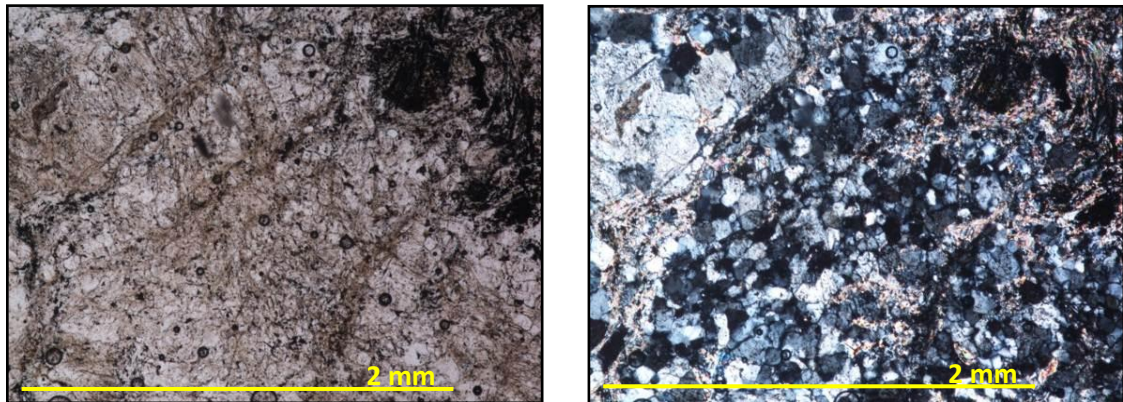
Muestra del pórfido al costado este, retirado del núcleo silíceo unos 3 metros. Esta muestra está un poco menos alterada que la anterior dejando ver mucho mejor los cristales de ortoclasa.



**Figura 30.** Granitoide ubicado al este del núcleo silíceo.

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular, presenta igualmente sericita como producto de la alteración pero es una de las muestras que mejor deja ver la presencia de ortoclasa.



**Figura 31.** Aspecto microscópico general de la muestra.

**Cuarzo (30%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, subhedrales, equigranulares, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Tiene un tamaño que va de 0,04 mm a 0,2 mm.

**Ortoclasa (45%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, biáxico. Tiene un tamaño que supera los 2,5 mm. Se observa como es alterada por sericita.

**Sericita (15%):** Pequeños cristales incoloros, pero muy brillantes en nicoles cruzados, con un relieve de bajo a medio, colores de birrefringencia amarillos de segundo orden, biáxicos.

**Alunita (8%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, euhedrales, de habito tabular, colores de interferencia amarillos de primer orden, uniáxico.

**Opacos (2%):** Cristales de color negro, anhedrales con tamaños de 0,01 mm a 0,1 mm. Distribuidos en toda la muestra, se asocian mucho a la alunita.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	30	Sienogranito
Ortoclasa	45	
Plagioclasa	15	

**Tabla 9.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-01-11.

### TGJB-03-15

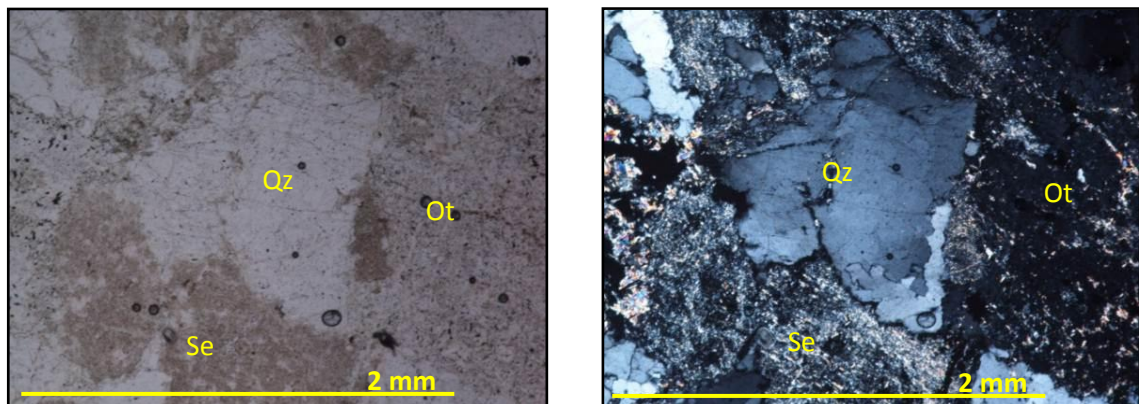
Muestra del cuerpo plutónico alejado unos 100 metros del área principal de estudio (2 estación).



**Figura 32.** Muestra de mano de roca granítica ubicada en el segundo afloramiento.

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular, Bastante alterada a sericita. Presenta dos variedades de cuarzo, tanto como pequeños cristales como grandes fenocristales. Es también evidente el procesos de alteración que está sufriendo la ortoclasa (figura 33)



**Figura 33.** Aspecto general de la muestra. Nótese la ortoclasa siendo alterada a sericita.

**Sericita (35%):** Pequeños cristales con un aspecto turbio en nicoles paralelos, pero muy brillantes en nicoles cruzados, con un relieve de bajo a medio, colores de birrefringencia amarillos de segundo orden, biáxico y con un tamaño de aproximadamente 0.02 mm.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (20%):** cristales con tamaños que van de 0,3 mm a 0,7 mm.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (5%):** cristales con un tamaño de 0,8 mm a 1,5 mm.

**Ortoclasa (30%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, biáxico.

**Alunita (7%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, euhedrales, de habito tabular, colores de interferencia amarillos de primer orden, uniáxico. Se presenta una duda con este mineral ya que la alunita presenta un color amarillento llegando casi hasta el rojo, pero en este caso es aspecto es muy parecido al de la muscovita. Apoyándonos en la DRX se ve un leve porcentaje de alunita, y uno alto de muscovita, pero como se explicara más abajo, esta muscovita puedo ser confundida como sericita, por lo tanto el mineral se deja establecido como alunita.

**Opacos (2%):** Pequeños agregados de cristales negros totalmente anhedrales, con tamaños de 0,07 mm a 0,15 mm.

**Zircón (1%):** Cristales incoloros, relieve alto, anhedral, redondeados, con colores de interferencia rosados y azules de tercer orden, uniáxico, con un tamaño de 0,05 mm.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	25	Monzogranito
Ortoclasa	30	
Plagioclasa	35	

**Tabla 10.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-15.

### TGJB-03-16

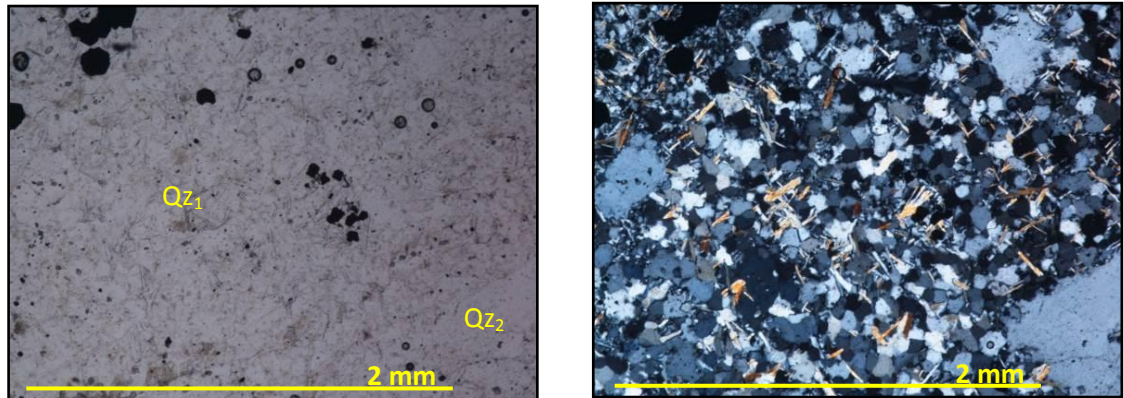
Petrográficamente es similar a la muestra TGJB-01-09 pero se encontró en el segundo afloramiento.



**Figura 34.** Muestra de mano de roca ígnea con una alta silicificación.

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular. Es muy parecida a la muestra TGJB-01-09, pero con menos porcentaje de alunita.

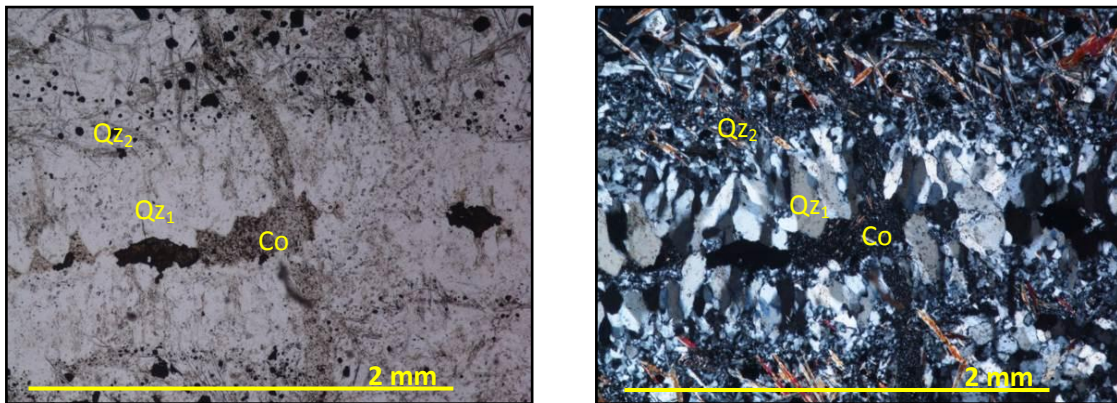


**Figura 35.** Aspecto microscópico general de la muestra.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la

totalidad de la muestra. Estos cuarzos se presentan a veces en venas con textura comb aunque la mayoría se da con una textura masiva.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (45%):** cristales con tamaños que van de 0,1 mm a 0,2 mm. En una vena se presenta con en una textura COMB.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (10%):** cristales con un tamaño de 0,2 mm a 0,9 mm.
- **Cuarzo<sub>3</sub> (5%):** cristales muy pequeños con un tamaño aproximadamente 0,02 mm.



**Figura 36.** Detalle de la textura COMB del cuarzo, acompañado de caolinita y el cuarzo 3.

**Alunita (30%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, euhedrales, de habito tabular, colores de interferencia amarillos y rojos de primer orden, uniáxico. Tamaño de los cristales de 0,1 mm a 0,8 mm de largo.

**Opacos (5%):** Cristales de color negro, anhedrales, con diversos tamaños que van de 0,02 mm a 0,14 mm y otros que superan los 0,32 mm. Se dan en la totalidad de la muestra.

**Caolinita (2%):** Cristales incoloros, anhedrales, con colores de birrefringencia grises de primer orden, biáxico, el tamaño de grano es muy pequeño, menores de 0,01 mm.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	55	Cuarzolita
Ortoclasea	0	
Plagioclasea	0	

**Tabla 11.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-16.

**TGJB-03-17**

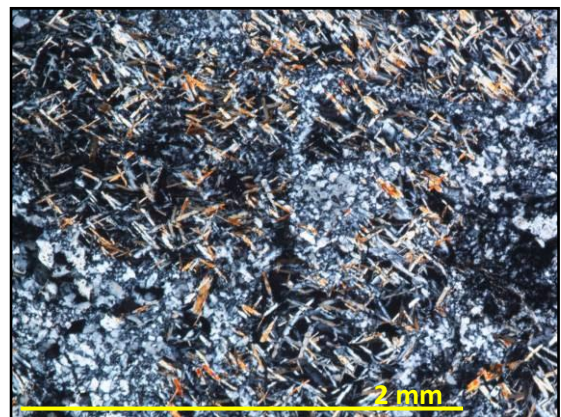
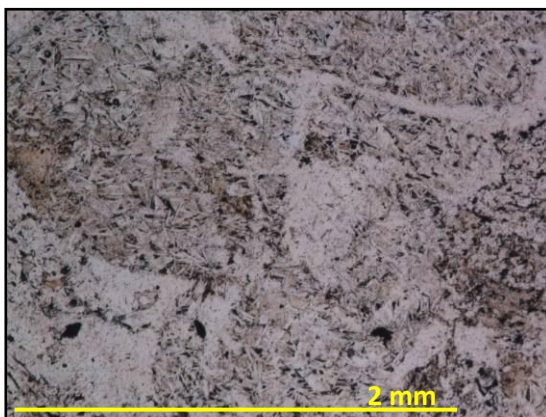
Muestra con una alta silicificación extraídas del afloramiento 2, contiene un vetilleo de cuarzo y de cuarzo + pirita.



**Figura 37.** Roca con alto grado de silicificación con vetilleo de cuarzo y pirita (estación 2).

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular. Contiene venas de cuarzo + pirita y de solo cuarzo, se evidencia una alta silicificación con un contenido importante de alunita



**Figura 38.** Aspecto microscópico general de la muestra.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la totalidad de la muestra.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (45%):** cristales con tamaños que van de 0,02 mm a 0,06 mm.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (10%):** tamaño de cristales de 0,1 mm a 0,14 mm, se encuentran también asociados a venas. Se presenta con una textura de mosaico.
- **Cuarzo<sub>3</sub> (2%):** grandes fenocristales que superan las 0.6 mm.

**Alunita (35%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, euhedrales, de hábito tabular, colores de interferencia amarillos y rojos de primer orden, uniáxico. Se encuentran alterando toda la muestra y parece envolver los cristales de cuarzo.

**Opacos (5%):** Cristales de color negro, anhedrales, con diversos tamaños que van de 0,017 mm a 0,2 mm. Se encuentran dispuestos en las venas asociados al cuarzo, en lo que parece ser pirita.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	57	Cuarzolita
Ortoclasa	0	
Plagioclasa	0	

**Tabla 12.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-17.

### TGJB-03-18

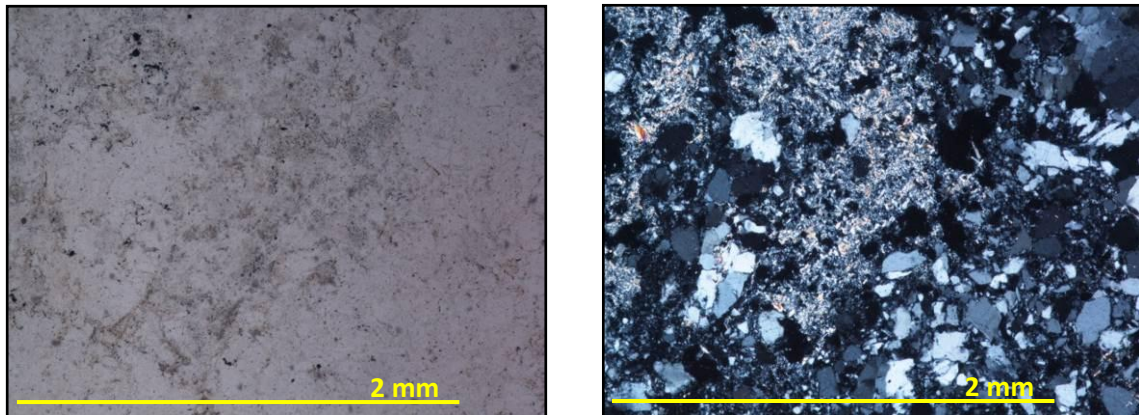
Pertenece igualmente al segundo afloramiento, se trata del dique mostrando una alteración tipo argilica.



**Figura 39.** Muestra de mano TGJB-03-18.

- **Petrografía**

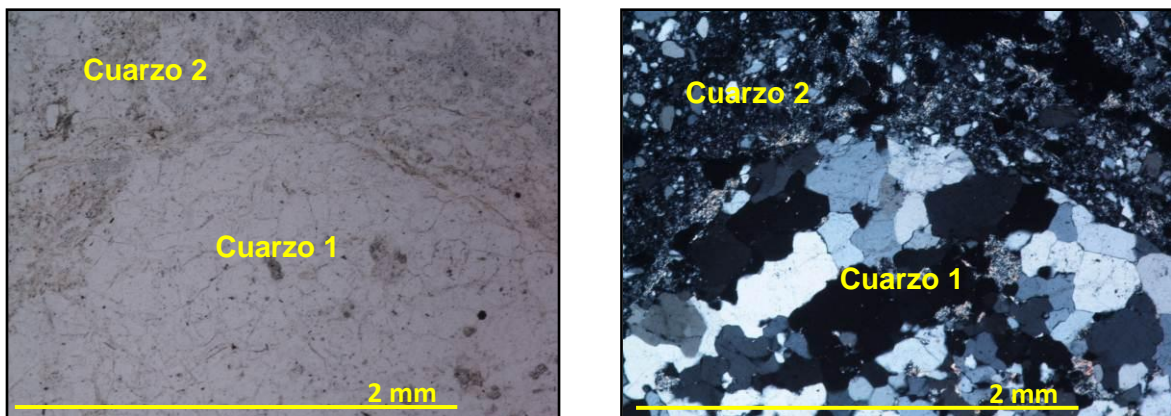
Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular. Esta casi en su totalidad compuesta de cuarzo evidenciando al igual que muchas de las muestras, sericita como producto de alteración.



**Figura 40.** Aspecto microscópico general de la muestra.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la totalidad de la muestra.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (50%):** grandes cristales con tamaños que van de 0,1 mm a 0,6 mm. Se presenta con una textura de mosaico.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (20%):** cristales con un tamaño de 0,1 mm a 0,04 mm.



**Figura 41.** Detalle del cuarzo 1 y 2.

**Sericita (10%):** Pequeños cristales incoloros, pero muy brillantes en nicoles cruzados, con un relieve de bajo a medio, colores de birrefringencia amarillos de segundo orden, biáxico con un tamaño de aproximadamente 0.02 mm.

**Caolinita (14%):** Cristales incoloros, anhedrales, con colores de birrefringencia grises de primer orden, biáxico, el tamaño de grano es muy pequeño, menores de 0,01 mm.

**Alunita (4%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, euhedrales, el habito es menos tabular que en muestras anteriores, colores de interferencia amarillos y rojos de primer orden, uniáxico.

**Opacos (1%):** Cristales de color negro, anhedrales con tamaños de 0,02 a 0,1mm.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	70	Granitoide rico en cuarzo
Ortoclasa	0	
Plagioclasa	10	

**Tabla 13.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-03-18.

### TGJB-03-19

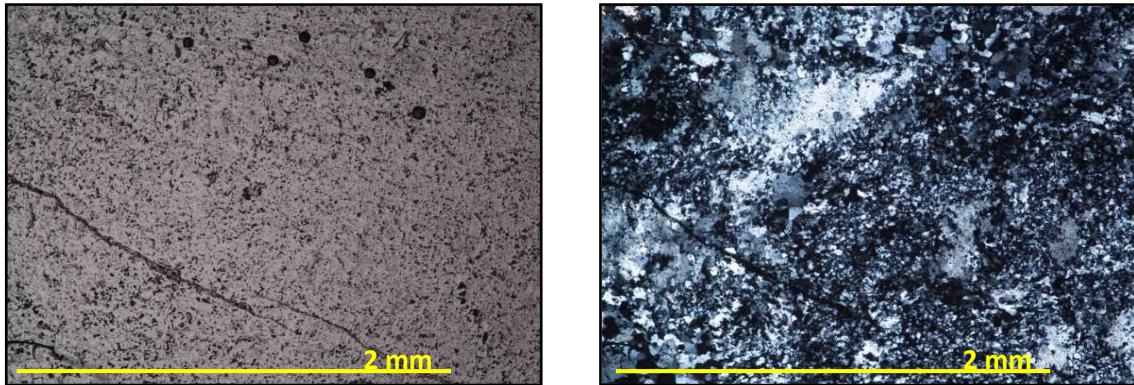
Esta muestra consta de unas venas de cuarzo dentro de roca alterada altamente alterada, aunque la venas son es su totalidad de cuarzo, estas presentan diferentes tipos de texturas.



**Figura 42.** Venas de cuarzo dentro del putón.

- **Petrografía**

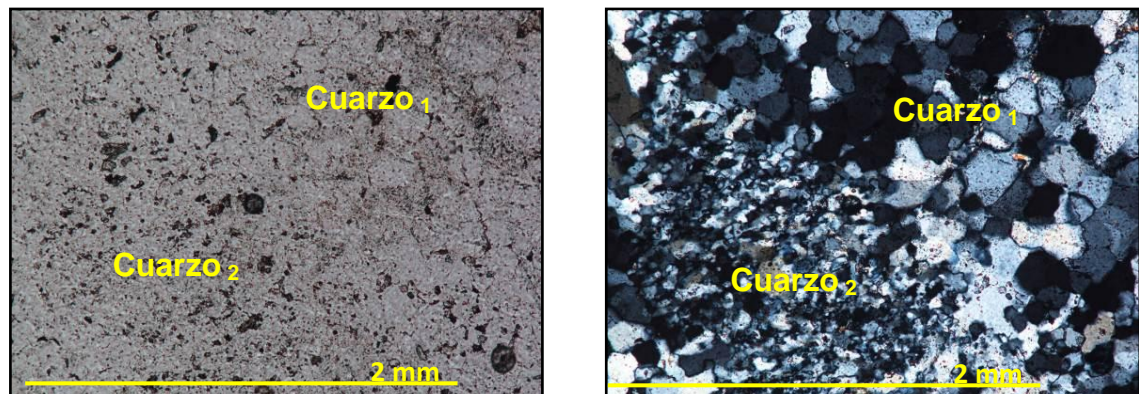
Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular. Presenta diferentes texturas y tamaños de cuarzos.



**Figura 43.** Aspecto microscópico general de la muestra.

**Cuarzo (90%):** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico. Ocupan casi la totalidad de la muestra.

- **Cuarzo<sub>1</sub>:** Tienen un tamaño de 0.1 mm a 0,4 mm y se disponen en una textura de mosaico.
- **Cuarzo<sub>2</sub>:** Pequeños agregados con las mismas características que los anteriores pero con un tamaño de 0,01 mm a 0,1 mm.



**Figura 44.** Detalle del cuarzo tipo 1 y 2.

- **Cuarzo** <sub>3</sub>: Cristales xenomorfos con los bordes totalmente irregulares, y con tamaños de entre 0,3 mm y 0,8 mm dispuestos en un textura semejante a la plumosa
- **Cuarzo** <sub>4</sub>: Grandes cristales mayores a 1.5 mm

### TGJB-03-21

Venas de cuarzo + pirita dentro del plutón con alteración argílica.



**Figura 45.** Muestra alterada con presencia de venas de cuarzo más pirita.

### 4.2.2. Análisis litologías en el bloque A.

#### TGJB-02-13

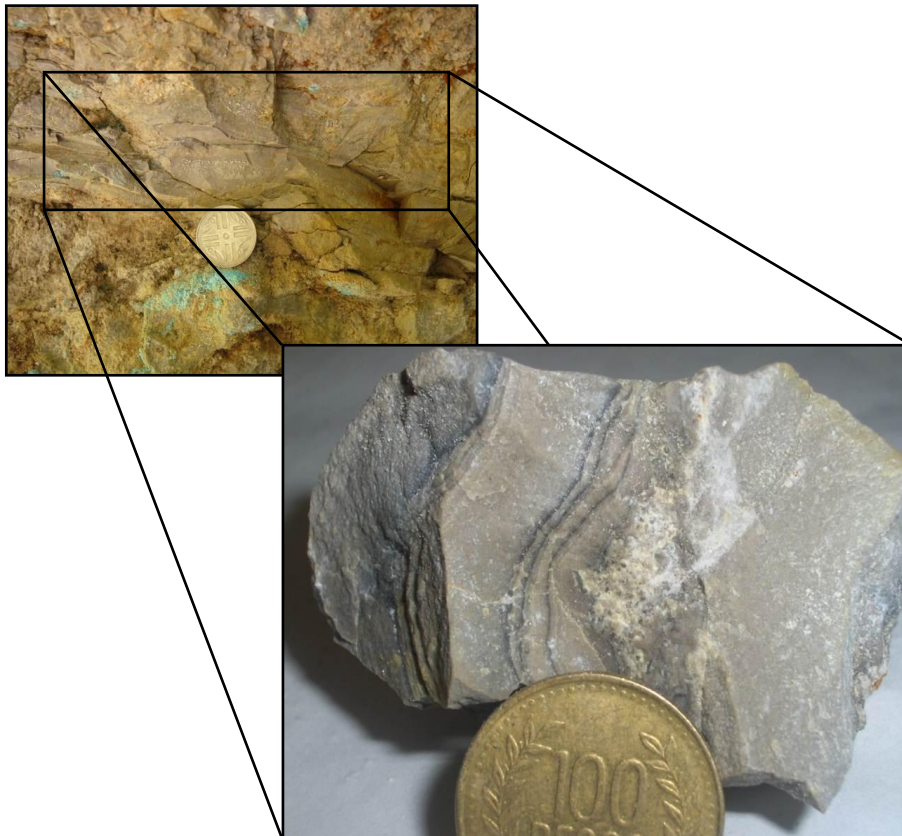
Muestra silicificada con una cantidad considerable de calcantita, al igual que la torbernita, la calcantita se da en zonas de oxidación pero este ya es un producto secundarios de sulfuros de Cu, éste mineral perteneciente al grupo de los sulfatos y cuya fórmula química es  $\text{Cu}(\text{SO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , presenta una dureza de 2.5 de color azul intenso y brillo vítreo, sus cristales se dan de forma tabular, aunque en este caso se presentan a manera de pequeños agregados sin forma.



**Figura 46.** Muestra silicificada, con un considerable contenido de calcantita.

### TGJB-02-14

Esta muestra representa un xenolito de cuarzo amorfo, posiblemente un polimorfo de cuarzo, alojado a la largo de una diaclasa en el cuerpo plutónico, posee una pequeñas laminaciones de color oscuro.



**Figura 47.** Muestra de cuarzo xenomorfo dentro del plutón.

## TGJB-02-12

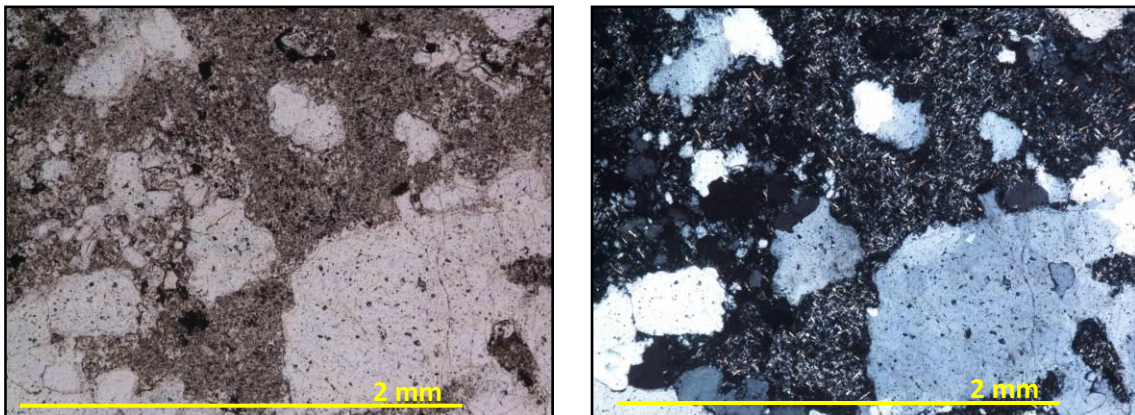
Es de especial interés la distribución espacial de las vetillas de cuarzo presentes en una de las rocas ígneas, ya que semejan mucho a la distribución de las venas en un sistema de pórfido.



**Figura 48.** Roca granítica con venas paralelas.

- **Petrografía**

Muestra holocristalina, tamaño de los cristales inequigranular, contiene grandes cristales de cuarzo así como un alto contenido de sericita.



**Figura 49.** Aspecto microscópico general de la muestra donde se evidencia la alta seritización.

**Cuarzo:** Cristales incoloros, de bajo relieve, anhedrales, con colores de interferencia grises de primer orden, anisotrópico, uniáxico.

- **Cuarzo<sub>1</sub> (30%):** cristales con tamaños de entre 1 mm a 1,6 m.
- **Cuarzo<sub>2</sub> (5%):** Cristales con un tamaño de 0,1 a 0,2

**Sericita (62%):** Pequeños cristales incoloros, pero muy brillantes en nicoles cruzados, con un relieve de bajo a medio, colores de birrefringencia amarillos de segundo orden.

**Opacos (3%):** Cristales de color negro, anhedrales. Varían en el tamaño.

FASE MINERAL	PORCENTAJE	Clasificación
Cuarzo	35	Tonalita
Ortoclasea	0	
Plagioclasea	62	

**Tabla 14.** Composición y clasificación modal de la muestra TGJB-02-12.



**Figura 50.** Detalle de las sheet veins o venas paralelas dentro de roca granítica (en rojo se muestra la orientación de las vetillas).

Es evidente que las litologías presentes en la zona de estudio han estado bajo procesos alteración. Como lo muestra la petrografía y lo corrobora la difracción presentada a continuación, las muestras presentan en la zona del núcleo síliceo

(TGJB-01-07, TGJB-01-08 y TGJB-01-09) una alteración de tipo cuarzo-alunita y una alta silicificación. Por otro lado, las alteraciones presente en el cuerpo plutónico muestra alteración tipo Sericitica con algo de caolinita (argilica).

Los cuerpo ígneos son predominantemente de textura afanítica con altas cantidades de cuarzo de diferentes tipos de tamaño evidenciando por lo menos dos procesos magmáticos, además de la presencia de ortoclasa y en algunas rocas mostrando un alto contenido de alunita y sericita, dejando ver la alta alteración ya sea por la fuertísima acción de los fluidos o por el largo tiempo de interacción entre el fluido y la roca.

#### 4.3. RESULTADOS DRX.

Se analizaron un total de 8 muestras mediante DRX (Tabla 15), estos resultados muestran las fases cristalinas presente como un soporte para el análisis petrográfico dando valores cualitativos más exactos de las fases cristalinas. Todas las muestras pertenecen al bloque B. Es importante aclarar que la fase sericita presente en grandes cantidades en muchas de las muestras no aparece en los resultados de difracción de rayos X y la fase muscovita que reporta la difracción no fue vista en el análisis en las cantidades registradas. Lo anterior fue consultado a los químicos responsables del laboratorio de DRX respondiendo lo siguiente: “en cuanto a la sericita, ésta puede confundirse con la muscovita, ya que ésta se forma por la alteración de las plagioclasas con respecto al potasio. Por lo tanto se hizo la búsqueda en otra base de datos cristalográfica (Inorgánica Crystal Structure Database-ICSD) y se encontró que el perfil de difracción para la **sericita** coincide con el perfil de difracción de la **muscovita**. Lo que pasa es que en la base de datos de la PDF-2 (que es la que utilizan para la identificación) no se encuentra los datos cristalográficos para la sericita anteriormente mencionada y por ello aparece que la muscovita es la fase de mayor coincidencia y fue la que se

reportó en el informe, por eso es mejor dejar la moscovita y aclarar que la sericita es el nombre que se le aplica a la moscovita muy finamente cristalizada a causa de la alteración de las plagioclasas potásicas”.

Por lo anterior se aclara que en los siguientes cuadros debe considerarse la fase muscovita como sericita. El rango de los porcentajes reportados (cálculos semicuantitativos), son tomados de los valores mínimos y máximos de los análisis de DRX.

Muestra	Afloramiento	Bloque	Tipo de roca
TGJB-01-03	1	Sur	Ígnea
TGJB-01-04	1	Sur	Ígnea
TGJB-01-07	1	Sur	Ígnea
TGJB-01-09	1	Sur	Núcleo silíceo
TGJB-01-10	1	Sur	Ígnea
TGJB-01-11	1	Sur	Ígnea
TGJB-03-15	3	Sur	Ígnea
TGJB-03-18	3	Sur	Ígnea

**Tabla 15.** Muestras analizadas por DRX.

#### 4.3.1. Fases cristalinas presentes.

##### TGJB-01-03

Muestra del cuerpo ígneo el cual hospeda venas de cuarzo negro intenso.

Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	$\text{Si O}_2$	61.3 % (D.E = 0.3)
Alunita	$\text{K Al}_3 (\text{SO}_4)_2 (\text{OH})_6$	0.6 % (D.E = 0.1)
Caolinita	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	2.7 % (D.E = 0.1)
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	N.C
Coesita	$\text{Si O}_2$	1.0 % (D.E = 0.1)
Total cristalinos		65.6 %
Amorfos y otros		34.4 %

**Tabla 16.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-03.

### TGJB-01-04

Muestra similar a la anterior, pero con tamaño de los cristales ligeramente más fino, además, presenta también las venas de cuarzo con un negro intenso.

Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	Si O <sub>2</sub>	61.3 % (D.E = 0.3)
Anatasa	TiO <sub>2</sub>	1.1 % (D.E = 0.1)
Caolinita	Al <sub>2</sub> ( Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (OH) <sub>4</sub>	17.5 % (D.E = 0.2)
Alunita	K Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1.5 % (D.E = 0.1)
Halita potásica	K <sub>0.4</sub> Na <sub>0.6</sub> Cl	0.5 % (D.E = 0.1)
Cristobalita	Si O <sub>2</sub>	N.C
Barita	BaSO <sub>4</sub>	1.3 % (D.E = 0.1)
Total cristalinos		82.2 %
Amorfos y otros		17.8 %

**Tabla 17.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-04.

### TGJB-01-07

Como era de esperarse, tratándose del núcleo silíceo, la composición principal es cuarzo, con la presencia igualmente de un polimorfo de cuarzo (estishoveita). Se presenta un porcentaje considerable de alunita, aunque en muestra de mano no es apreciable.

Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	Si O <sub>2</sub>	61.3 % (D.E = 0.3)
Pirita	FeS <sub>2</sub>	2.9 % (D.E = 0.1)
Alunita	K Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	19.0 % (D.E = 0.3)
Dolomita	Ca ( Mg , Fe ) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.4 % (D.E = 0.1)
Estishoveita	Si O <sub>2</sub>	3.1 % (D.E = 0.1)
Total cristalinos		93.7 %
Amorfos y otros		6.3 %

**Tabla 18.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-07.

### TGJB-01-09

Relicto porfirítico con fenocristales de alunita, como se puede observar mas abajo, la alunita es predominante en esta roca, la pirita presente hace parte de la vetillas de cuarzo+pirita y de solo pirita

Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	Si O <sub>2</sub>	35.4 % (D.E = 0.2)
Pirita	FeS <sub>2</sub>	2.4 % (D.E = 0.1)
Alunita	K Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	53.7 % (D.E = 0.4)
Total cristalinos		91.5 %
Amorfos y otros		8.5 %

**Tabla 19.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-09.

### TGJB-01-10

Es notable la alta concentración de la sericita con poco menos del 50% de la muestra debido a la alta alteración de la roca, la ortoclasa registrada parece ser la precursora de dicha alteración

Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	Si O <sub>2</sub>	19.6 % (D.E = 0.3)
Alunita	K Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1.6 % (D.E = 0.1)
Ortoclasa	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	17.7 % (D.E = 0.2)
Moscovita (sericita)	K Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> Al O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	19.1 % (D.E = 0.2)
Caolinita	Al <sub>2</sub> ( Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (OH) <sub>4</sub>	3.6 % (D.E = 0.2)
Sericita	K Al <sub>2</sub> ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	27.8 % (D.E = 0.3)
Total cristalinos		89.4 %
Amorfos y otros		10.6 %

**Tabla 20.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-10.

### TGJB-01-11

Muestra muy parecida a la anterior pero con menos alteración, dejando ver una alta cantidad de ortoclasa precursora de la sericita.

Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	Si O <sub>2</sub>	12.5 % (D.E = 0.2)
Moscovita (sericita)	K Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> Al O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	14.8 % (D.E = 0.3)

Ortoclasa	$K Al Si_3 O_8$	58.6 % (D.E = 0.5)
Alunita	$K Al_3 (SO_4)_2 (OH)_6$	1.5 % (D.E = 0.1)
Total cristalinos		87.4 %
Amorfos y otros		12.6 %

**Tabla 21.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-01-11.

### TGJB-03-15

Muestra del cuerpo porfirítico semejante a las dos anterior pero ubicada en el segundo afloramiento, a aproximadamente 100 del núcleo silíceo.

Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	$Si O_2$	12.7 % (D.E = 0.3)
Moscovita (sericita)	$K Al_2 Si_3 Al O_{10} (OH)_2$	35.4 % (D.E = 0.5)
Ortoclasa	$K Al Si_3 O_8$	44.2 % (D.E = 0.9)
Alunita	$K Al_3 (SO_4)_2 (OH)_6$	1.7 % (D.E = 0.1)
Total cristalinos		94.0 %
Amorfos y otros		6.0 %

**Tabla 22.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-03-15.

### TGJB-03-18

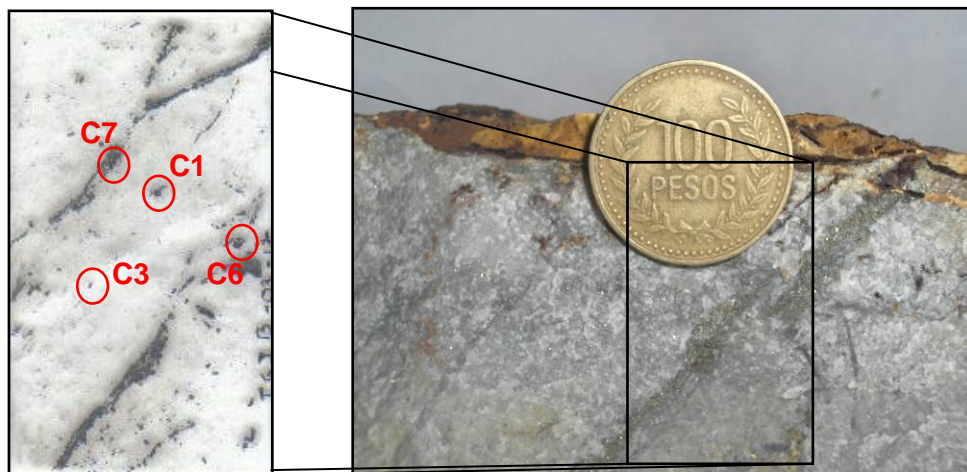
Fases Minerales	Fórmula Química	Porcentaje
Cuarzo	$Si O_2$	68.5 % (D.E = 0.3)
Moscovita (sericita)	$K Al_2 Si_3 Al O_{10} (OH)_2$	10.9 % (D.E = 0.2)
Alunita	$K Al_3 (SO_4)_2 (OH)_6$	6.1 % (D.E = 0.2)
Pirita	$FeS_2$	1.5 % (D.E = 0.1)
Halita potásica	$K_{0.4} Na_{0.6} Cl$	0.6 % (D.E = 0.1)
Total cristalinos		87.6 %
Amorfos y otros		12.4 %

**Tabla 23.** Fases cristalinas presentes en la muestra TGJB-03-18.

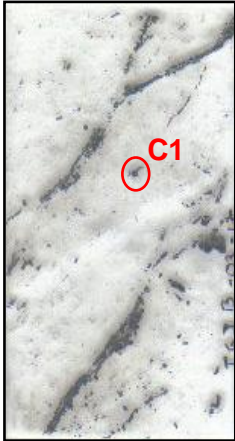
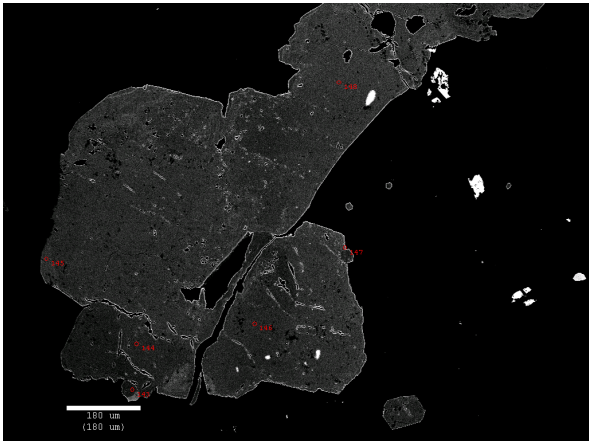
#### 4.4. QUÍMICA MINERAL

Fueron escogidas 2 muestras hospedadas dentro del cuerpo plutónico ubicadas en el tercer afloramiento del bloque B, éstas muestras (TGJB-03-17 y TGJB-03-21) contienen vetillas de cuarzo y de cuarzo más pirita. De cada muestra se seleccionaron 4 cristales de pirita y a cada cristal se le hizo un mínimo de 1 análisis y un máximo de 8 mediante microsonda. En cada uno de los puntos de muestreo se encontraron los siguientes elementos: Zn Pb, Fe, Cu, S, As y Mo donde evidentemente por tratarse de pirita, los valores de Fe y S son los predominantes estando entre 45,4 y 46,8 los primeros y entre 52,7 y 54.8 los segundos. La suma de estas composiciones debería dar aproximadamente 100 incluyendo el error presente en cada análisis, además, cabe resaltar que los valores negativos (en color rojo) que muestran algunos elementos se deben a una dificultad al momento de la calibración del equipo, por lo tanto el valor el molibdeno registrado en todos los cristales no debe tenerse en cuenta, así como la mayoría de valores de arsénico y algunos valores de plomo.


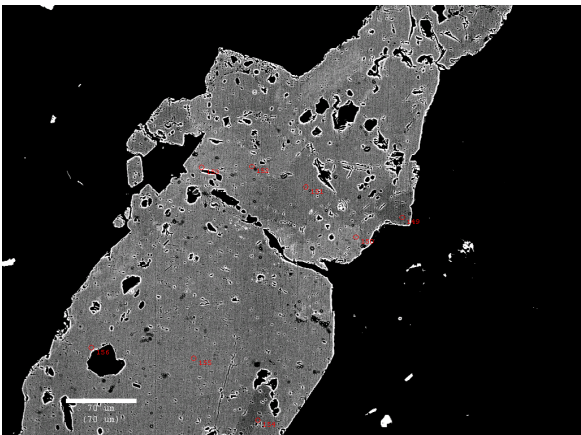
##### 4.4.1. Muestra TGJB-03-17




**Figura 51.** Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis.

CRISTAL 1								
								
Punto	Composición (WT%)							TOTAL
	Zn	Pb	Fe	Cu	S	As	Mo	
146	0,089719	-0,28145	46,5634	-0,08845	53,9116	-0,01041	-0,39457	99,7899
147	0,09304	0,151484	46,4879	0,015099	54,4779	0,020447	-0,2778	100,968
148	-0,10383	0,010212	46,5848	0,020144	53,905	-0,02489	-0,27886	100,113

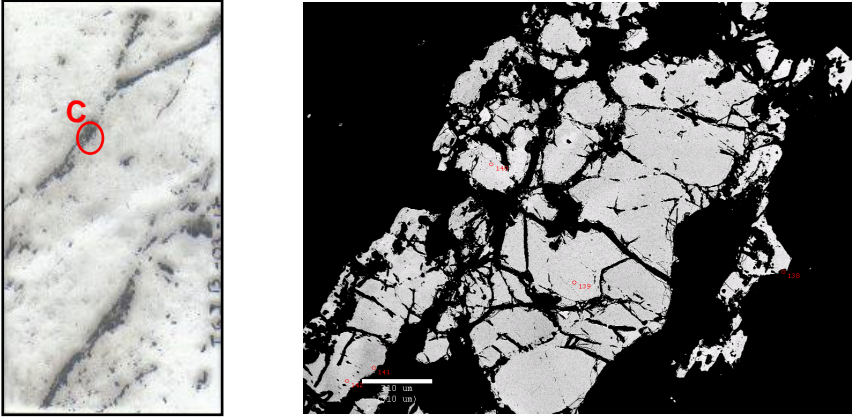
**Tabla 24.** Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C1.

CRISTAL 3								
								
Punto	Composición (WT%)							TOTAL
	Zn	Pb	Fe	Cu	S	As	Mo	
149	-0,03939	0,372703	46,4207	-0,03273	53,4302	-0,00336	-0,14941	99,9987
150	0,017907	0,132756	46,3958	0,012587	53,0045	-0,02626	-0,26992	99,2674
151	-0,0645	-0,33732	46,4458	0,037808	53,5141	0,020106	-0,19536	99,4206
152	0,153686	0,157785	46,8947	0,062835	53,626	0,033484	-0,27819	100,65
154	0,12888	0,201446	46,4717	-0,01511	53,5899	0,012893	-0,28468	100,105
155	0,135976	0,071443	46,4296	-0,02013	53,2245	-0,00121	-0,26981	99,5704
156	-0,1182	-0,09194	46,7098	0,055423	53,1899	-0,00605	-0,14838	99,5905

**Tabla 25.** Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C3.

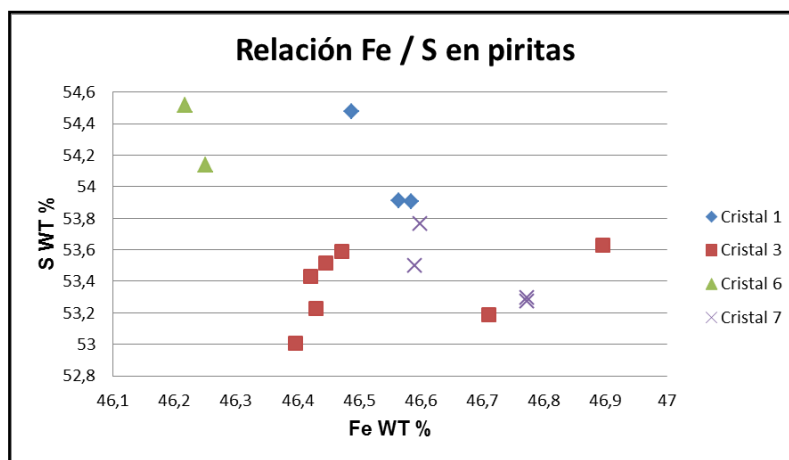
CRISTAL 6								
								
Punto	Composición (WT%)							TOTAL
	Zn	Pb	Fe	Cu	S	As	Mo	
61	0,018095	-0,13235	46,2499	0,035626	54,1395	0,01539	-0,12736	100,199
62	0,055972	0,072678	46,2172	0,006942	54,5175	0,007729	-0,31505	100,563

**Tabla 26.** Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C6.

CRISTAL 7								
								
Punto	Composición (WT%)							TOTAL
	Zn	Pb	Fe	Cu	S	As	Mo	
139	0,06438	0,408128	46,5992	-0,03271	53,7661	-0,02355	-0,34199	100,439
140	0,014329	-0,11234	46,772	0,057913	53,272	-0,01535	-0,38407	99,6045
141	0,060937	-0,08177	46,7727	0,022681	53,2975	-0,03311	-0,3509	99,688
142	0,042939	0,38786	46,5905	0,005036	53,4958	-0,03618	-0,15361	100,332

**Tabla 27.** Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-17 –C7.

La figura 52 muestra que los valores de S y Fe se mantienen entre la composición típica de la pirita que es 53,6 de S y 46,4 de Fe sin importar si se trata de la pirita que componen las vetillas o la que se halla como componente de la roca.



**Figura 52.** Relación del Fe vs S en piritas. Los cristales 1 y 3 provienen de la roca, el 6 y 7 son piritas hospedadas en la vetillas.

Los valores de Pb permanecen en el rango de 0,017 wt % y 0,15 wt % con la excepción de dos cristales que registran un porcentaje de 0,38 wt % y 0,40 wt %. En cuanto al contenido de Zn y Cu, se aprecia que el primero presenta valores más altos que el segundo, esta diferencia se ve mucho más clara en las piritas hospedadas en las venillas de solo pirita.

#### 4.4.2. Muestra TGJB-03-21

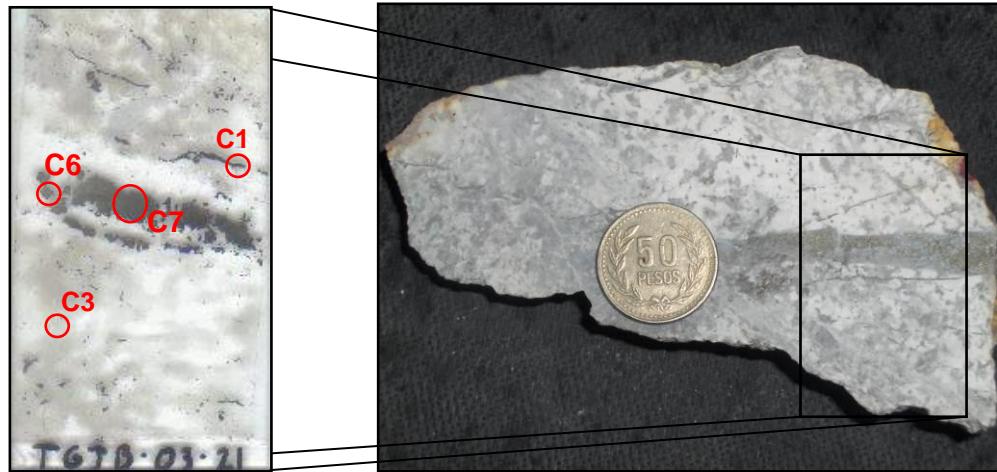


Figura 53. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis.


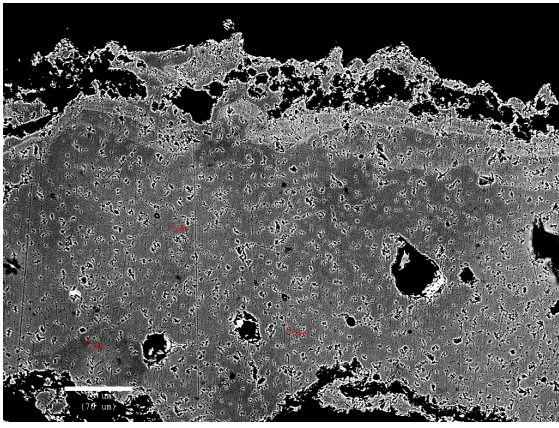

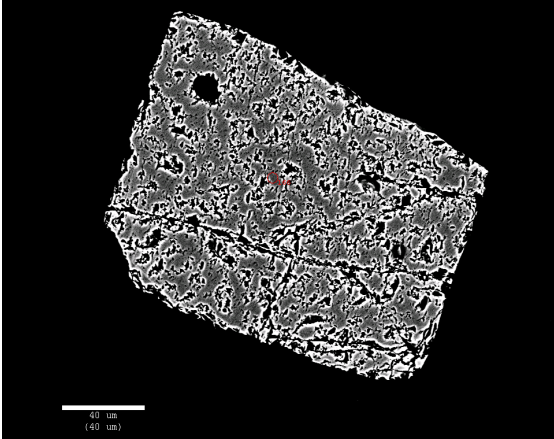
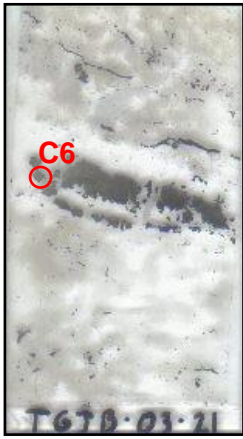
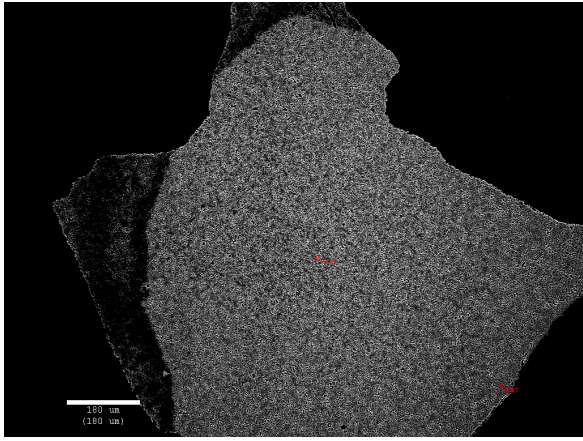
CRISTAL 1								
								
Punto	Composición (WT%)							TOTAL
	Zn	Pb	Fe	Cu	S	As	Mo	
161	-0,03584	-0,0767	45,4417	0,005045	52,7901	-0,00972	-0,30834	97,8062
164	0,0179	0,270517	46,5035	-0,05539	54,0177	-0,01688	-0,39296	100,344
165	0,010755	0,020438	46,5009	-0,04538	52,8202	-0,00526	-0,25972	99,0419

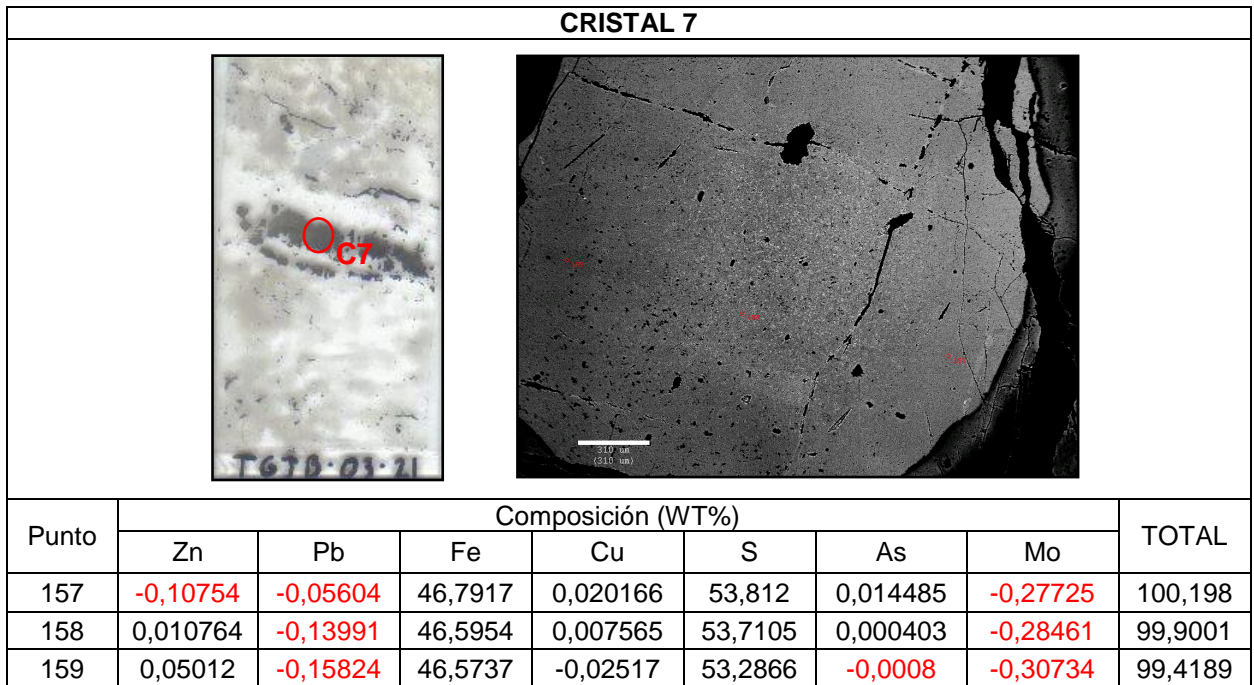
Tabla 28. Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C1.

CRISTAL 3								
								
Punto	Composición (WT%)							TOTAL
	Zn	Pb	Fe	Cu	S	As	Mo	
166	-0,05735	-0,10735	46,2574	-0,00504	53,0235	-0,00706	-0,26466	98,8394

**Tabla 29.** Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C3.

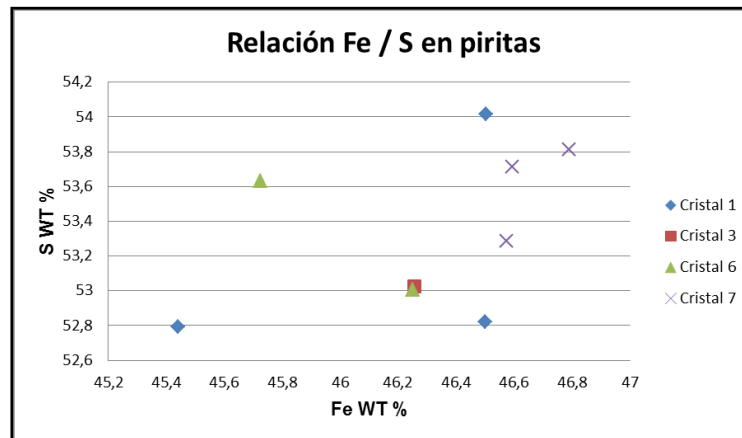
CRISTAL 6								
								
Punto	Composición (WT%)							TOTAL
	Zn	Pb	Fe	Cu	S	As	Mo	
167	0,007158	0,061224	46,2492	0,020129	53,0057	-0,0047	-0,2665	99,0722
168	0,025079	0,153294	45,7259	0,027708	53,6311	-0,01071	-0,12928	99,4231

**Tabla 30.** Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C6.



**Tabla 31.** Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en el sulfuro. Muestra TGJB-03-21–C7.

Al igual que la muestra anterior, las piritas de muestran porcentajes de Fe y S normales con pequeñas variaciones de menos de 1.2 % en el contenido de Fe.



**Figura 54.** Relación del Fe vs S en piritas. El cristal 3 proviene de la roca, los demás están hospedados en la vetilla de cuarzo más pirita.

A diferencia de la muestra anterior donde se tiene venas de solo pirita, los valores de Zn que presentan las piritas aquí y que en este caso se dan en venas de cuarzo más pirita, son relativamente más bajos, dándose un valor máximo pero exclusivo de un punto de muestreo de 0,05 wt % y un mínimo de 0,007 wt %.

#### 4.5. ANÁLISIS GEOQUÍMICOS

Fueron escogidas 8 rocas representativas del cuerpo plutónico, si bien se habla de un solo dique, éste presenta diferentes tipos de alteración con pequeñas variaciones en cuanto al tamaño de grano y composicional. La muestra 01-09 es, como se ha dicho anteriormente, el cuerpo porfirítico dentro del núcleo silíceo y la muestra 01-05 hace referencia a un xenolito hospedado dentro del plutón. Debido a estas alteraciones, los resultados que a continuación se expondrán, reflejan las características actuales de las rocas, haciendo énfasis en que no se encontró una roca sin alteración que pueda ser tomada como la roca original.

##### 4.5.1. Clasificación química de las rocas (elementos mayores).

Muestra	TGJB-							
	01-01	01-04	01-05	01-09	01-10	01-11	03-15	03-18
SiO <sub>2</sub>	89.6	84.9	86.5	69.6	69.8	65.4	67.2	87.9
TiO <sub>2</sub>	1.64	0.67	0.40	0.41	0.49	0.45	0.67	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.98	5.55	7.24	10.10	18.55	19.10	17.95	5.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.41	1.66	1.35	3.00	1.00	0.77	1.61	1.11
FeO	0.22	0.20	0.26	1.04	0.33	0.35	0.80	0.35
MnO	0.008	0.007	0.007	0.018	0.015	0.011	0.024	0.013
MgO	0.02	0.02	0.03	0.02	0.53	0.31	0.50	0.16
CaO	0.20	0.04	0.04	0.10	0.08	0.06	0.12	0.07
Na <sub>2</sub> O	0.036	0.038	0.034	0.068	0.121	0.634	0.277	0.047
K <sub>2</sub> O	0.353	0.221	0.051	2.73	5.80	12.50	9.84	1.510
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.576	0.181	0.133	0.301	0.213	0.118	0.242	0.218
LOI	2.86	5.10	3.83	13.35	3.74	1.34	1.87	2.89

**Tabla 32.** Porcentajes en peso de los elementos mayores.

#### 4.5.1.1. Clasificación modal y normativa.

Muestra	TGJB-							
	01-01	01-04	01-05	01-09	01-10	01-11	03-15	03-18
Cuarzo	92,88	90,10	89,91	67,93	48,01	13,65	27,82	84,18
Ortoclasa	2,17	1,40	0,31	18,46	35,36	74,09	58,60	9,15
Plagioclasas	0	0	0	0	0,03	4,91	1,37	0
Hiperstena	0,05	0	0,08	0,06	1,36	0,77	1,26	0,41
Olivino	0	0,05	0	0	0	0	0	0
Magnetita	0	0	0	2,54	0	0	0,72	0,78
Ilmenita	0,50	0,47	0,59	0,89	0,75	0,77	1,28	0,27
Apatito	1,39	0,45	0,32	0,80	0,51	0,27	0,56	0,52
Otros	5,57	8,25	9,19	10,34	13,97	5,53	8,39	5,38
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>99,99</b>	<b>99,99</b>	<b>100</b>	<b>99,99</b>

Tabla 33. Composición normativa CIPW.

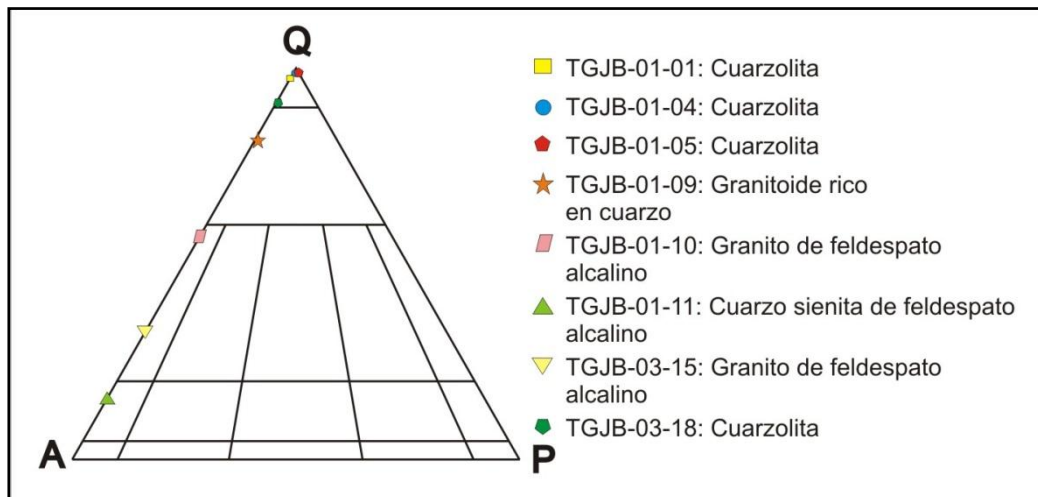


Figura 55. Clasificación modal de las rocas.

Como era de esperarse, las concentraciones de SiO excesivas son atribuidas por medio de la norma CIPW al cuarzo, dando así rocas casi enteramente de cuarzo (cuarzolititas).

#### 4.5.1.2. Clasificación según de la saturación de sílice y alúmina.

Dependiendo de la cantidad de sílice y alúmina de la roca (ver numeral 3.3.1.3), entendiéndose por saturación de la alúmina a la relación entre el  $Al_2O_3/(K_2O+Na_2O+CaO)$ , fue posible clasificar las rocas en rocas ácidas con un alto contenido de Si con la excepción de una muestra que tiene un valor menor de 66% de Si.

MUESTRA	CANTIDAD ABSOLUTA DE SÍLICE	CLASIFICACIÓN
TGJB-01-01	89,6	Ácidas
TGJB-01-04	84,9	
TGJB-01-05	86,5	
TGJB-01-09	69,6	
TGJB-01-10	69,8	
TGJB-01-11	65,4	Intermedia
TGJB-03-15	67,2	Ácidas
TGJB-03-18	87,9	

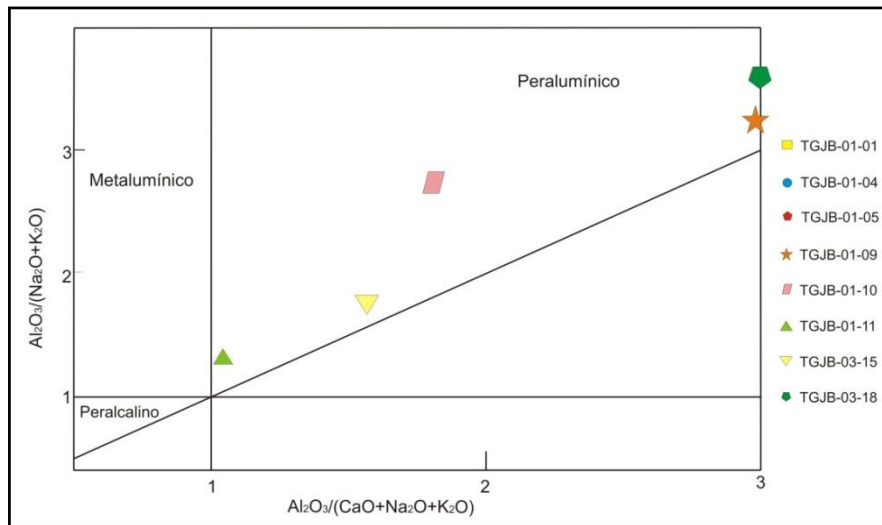
**Tabla 34.** Clasificación de las muestra respecto a la cantidad de sílice.

Para la clasificación respecto al contenido de alúmina es necesario conocer el peso molecular de  $Al_2O_3/(NaO + K_2O)$  [mol] y  $Al_2O_3/(CaO + NaO + K_2O)$  [mol] de cada muestra, y posteriormente graficar estos datos en el diagrama de Maniar y Piccoli (1989) figura 58.

MUESTRA	$Al_2O_3$	NaO	$K_2O$	CaO	Cantidad Molal				Al/N+K	Al/C+N+K
					$Al_2O_3$	NaO	$K_2O$	CaO		
TGJB-01-01	2,98	0,036	0,353	0,20	0,029 22	0,000 580	0,003 747	0,003 566	6,7529	3,7020
TGJB-01-04	5,55	0,038	0,221	0,04	0,054 43	0,000 6131	0,002 346	0,000 7132	18,394	14,8217
TGJB-01-05	7,24	0,034	0,051	0,04	0,071 00	0,000 5485	0,000 5414	0,000 7132	65,143	39,3766
TGJB-01-09	10,10	0,068	2,73	0,10	0,099 05	0,001 097	0,028 980	0,001 783	3,2986	3,1138
TGJB-01-10	18,55	0,121	5,80	0,08	0,181 934	0,001 9522	0,061 571	0,001 426	2,8640	2,8011
TGJB-01-11	19,10	0,634	12,50	0,06	0,187 328	0,010 229	0,132 696	0,017 831	1,2231	1,0955

TGJB-03-15	17,95	0,277	9,84	0,12	0,176 049	0,004 4691	0,104 458	0,002 139	1,6162	1,58508
TGJB-03-18	5,98	0,047	1,510	0,07	0,058 650	0,000 7583	0,016 029	0,001 2482	3,4937	3,2529

**Tabla 35.** Clasificación de las muestra respecto a la cantidad de alúmina. (en rojo los valores excesivamente altos para ser graficados).



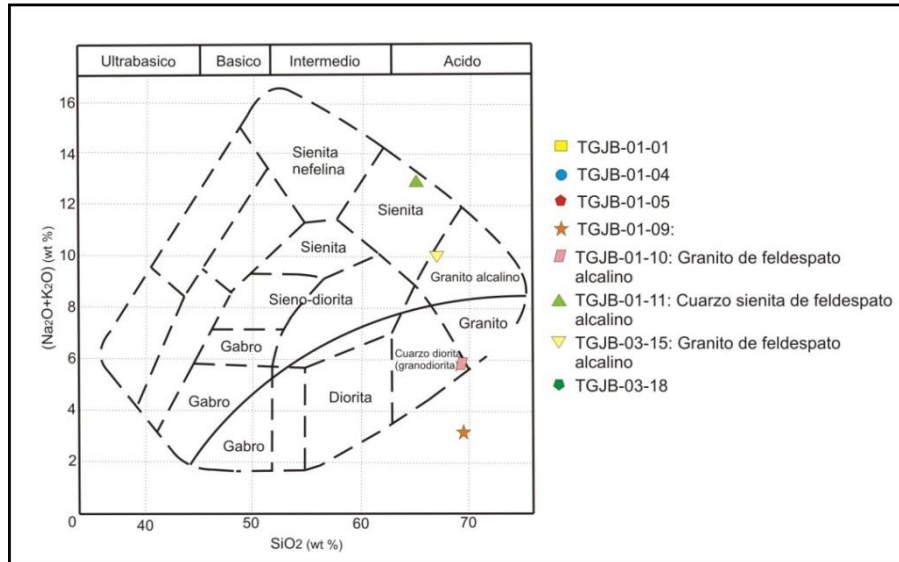
**Figura 56.** Diagrama de saturaciones de alúmina (Maniar y Piccoli, 1989).

Todas las muestras son clasificadas como peraluminosas ya que el contenido de alúmina es mayor que la suma de los álcalis (Na, K, Ca), pero debido a los bajos valores de los óxidos de Ca y K respecto a la alúmina registrados por las muestras TRGJ-01-01, 01-01 y 01-5 (valores en rojo en la tabla 35), estas no pueden ser graficadas ya que los valores son mucho más altos de los que la gráfica puede mostrar, pero igualmente la alúmina es mayor que la suma de los álcalis.

#### 4.5.1.3. Clasificación TAS

Esta clasificación creada por Wilson (1989) es de las más prácticas, en ella es expresado el nombre de la roca respecto a la cantidad de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) y de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Debido a la excesiva cantidad del óxido Si en algunas muestras,

estas se salen del campo de clasificación (las clasificadas como cuarzolitas), las demás rocas (TGJB-01-09, 01-10, 01-11, 03-15) como lo muestra la figura 57, conservan cierta relación entre la clasificación modal y la TAS.



**Figura 57.** Clasificación TAS (Wilson 1989). La clasificación de las rocas a la derecha hace parte de la clasificación modal

#### 4.5.1.4. Clasificación catiónica

La clasificación catiónica depende de los parámetros conocidos como R1 y R2 que a su vez dependen de los milicaciones de cada óxido (ver numeral 3.3.1.3.) de las ecuaciones 1 y 2, y teniendo presente la figura de clasificación de Rollinson 1993, se tiene que:

**Ecuación 1:**

$$R1: [4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)]$$

**Ecuación 2:**

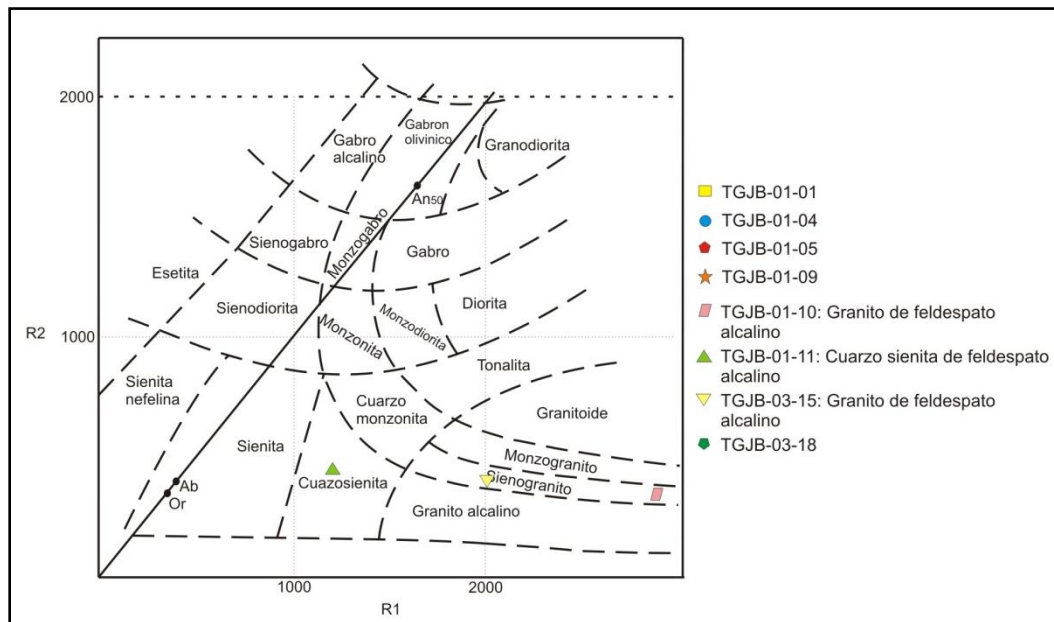
$$R2: 6Ca + 2Mg + Al$$

La alta cantidad de Si registrada en algunas de las muestra hizo que los valores de los milicaciones y por lo tanto del parámetro R1 diera mayor a 3000, que es la

cantidad máxima, por lo tanto estas muestras no son clasificadas mediante este método.

MUESTRA	R1	R2
TGJB-01-01	----	----
TGJB-01-04	----	----
TGJB-01-05	----	----
TGJB-01-09	----	----
TGJB-01-10	3079,31	398,730
TGJB-01-11	1188,1022	396,46
TGJB-03-15	2037,83	389,75
TGJB-03-18	----	----

**Tabla 36.** Valor de los parámetros R1 y R2. Los demás parámetro no fueron tomados en cuenta debido a los altos valores que dan.



**Figura 58.** Clasificación de las rocas mediante proporciones catiónicas (Rollinson, 1993).

#### 4.5.2. Elementos menores

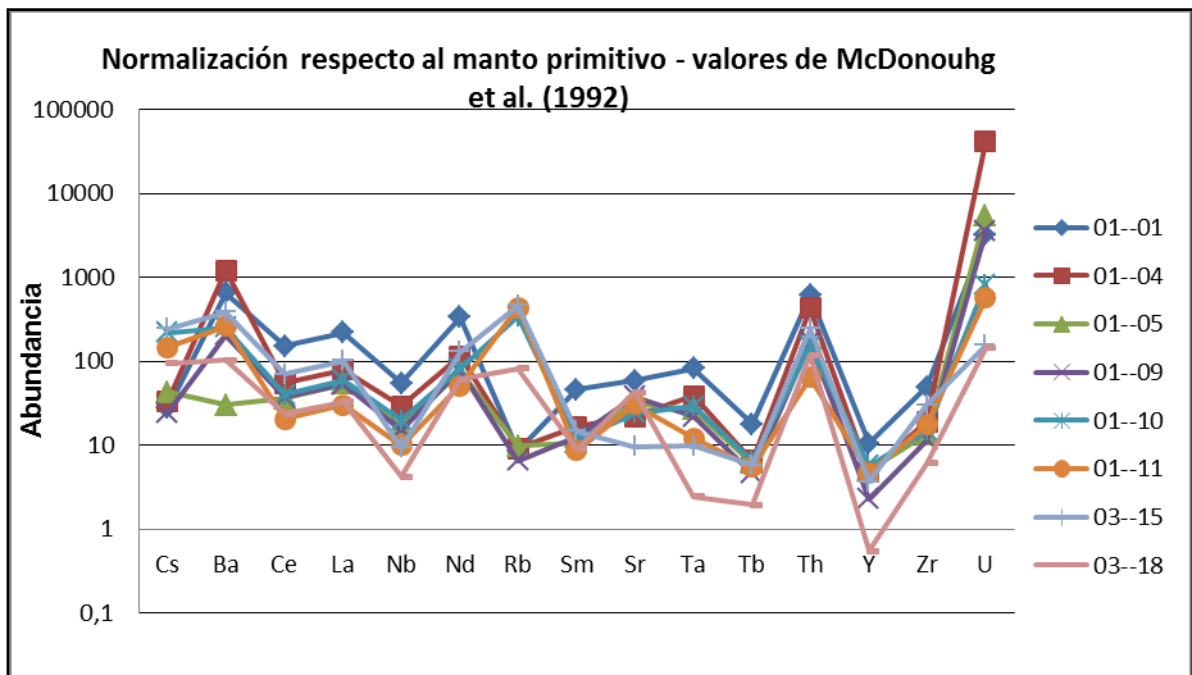
Estos elementos hacen referencia a las cantidades menores de 0,1 wt Wt o menores de 100 ppm (partes por millón) y que no intervienen generalmente en la estructura de la roca ya que son sustituidos por los elementos mayores. Se pueden dividir en elementos compatibles e incompatibles; los primeros hacen referencia a los elementos que preferiblemente se asocian a las fases solidas en el momento de cristalización del magma, los segundos, hacen referencia a aquellos elementos que prefieren asociarse al fluido residual de dicha cristalización.

Muestra	TGJB-								Valores del manto primitivo
	01-01	01-04	01-05	01-09	01-10	01-11	03-15	03-18	
Ba	4570	8420	213	1440	1785	1830	2710	723	6,99
Ce	280	101.5	66.4	68.6	74.1	37.7	130.0	43.6	1,833
Co	0.9	20.5	58.0	4.8	3.3	2.4	1.7	2.2	
Cr	40	30	20	40	80	20	50	30	
Cs	0.50	0.61	0.77	0.44	3.99	2.64	4.39	1.71	0,018
Dy	10.45	3.96	3.75	2.43	4.56	3.70	3.36	0.89	
Er	5.00	2.20	2.35	1.12	2.57	2.41	1.61	0.21	
Eu	4.45	1.88	1.31	1.33	1.52	1.06	1.29	0.86	
Ga	4.0	6.4	4.1	15.1	23.6	29.6	18.5	8.3	
Gd	13.00	5.50	4.02	4.23	4.67	3.08	4.03	1.83	
Hf	14.8	6.5	4.2	3.6	4.5	5.5	9.2	1.9	
Ho	1.90	0.73	0.79	0.39	0.93	0.76	0.65	0.11	
La	156.0	55.9	38.0	37.5	42.5	21.3	71.8	23.2	0,708
Lu	0.80	0.39	0.39	0.20	0.40	0.43	0.25	0.04	
Mo	22	74	44	10	14	28	12	5	
Nb	38.9	20.9	11.9	10.9	14.1	7.1	6.6	3.0	0,713
Nd	122.0	42.0	27.6	28.5	30.3	18.6	47.7	22.5	0,366
Pr	32.2	11.45	7.61	7.65	8.21	4.70	14.00	5.65	
Rb	5.4	5.8	6.2	4.2	216	280	294	52.4	0,635
Sm	20.4	7.39	4.74	5.71	5.25	3.85	6.50	3.99	0,444
Sn	8	2	1	3	2	3	4	2	
Sr	1235	464	658	803	512	648	205	908	21,1
Ta	3.4	1.6	1.1	0.9	1.2	0.5	0.4	0.1	0,041
Tb	1.94	0.71	0.66	0.50	0.70	0.59	0.63	0.21	0,108
Th	51.3	36.2	15.50	14.40	12.75	5.37	20.6	9.95	0,084

<b>Tl</b>	2.2	54.5	6.2	1.0	2.7	1.1	0.9	<0.5	
<b>Tm</b>	0.75	0.33	0.37	0.17	0.42	0.37	0.26	0.03	
<b>U</b>	66.9	876	115.0	73.9	17.35	12.05	3.28	3.04	0,021
<b>V</b>	113	86	86	183	131	416	95	104	
<b>W</b>	282	121	28	59	26	24	16	8	
<b>Y</b>	47.8	21.7	22.9	10.4	25.8	21.2	16.6	2.5	4,55
<b>Yb</b>	4.70	2.57	2.53	1.19	2.64	2.57	1.28	0.18	
<b>Zr</b>	550	213	150	129	168	198	338	69	11,2

**Tabla 37.** Abundancia de elementos traza.

Puede hablarse de 2 grupos generales en los que los elementos traza se pueden dividir. Están los elementos de alto potencial iónico (HFSE) llamados así por su carga alta iónica y su pequeño radio atómico, entre estos elementos están: Hf, Zr, Nb, U, Th y Ta, siendo la mayoría de estos elementos incompatibles. Y los elementos de radio iónico grande (LILE) representados por Ba, Rb Cs, Sr y K que tienden igualmente a ser incompatibles y quedarsen en la fase liquida durante la cristalización magmática.

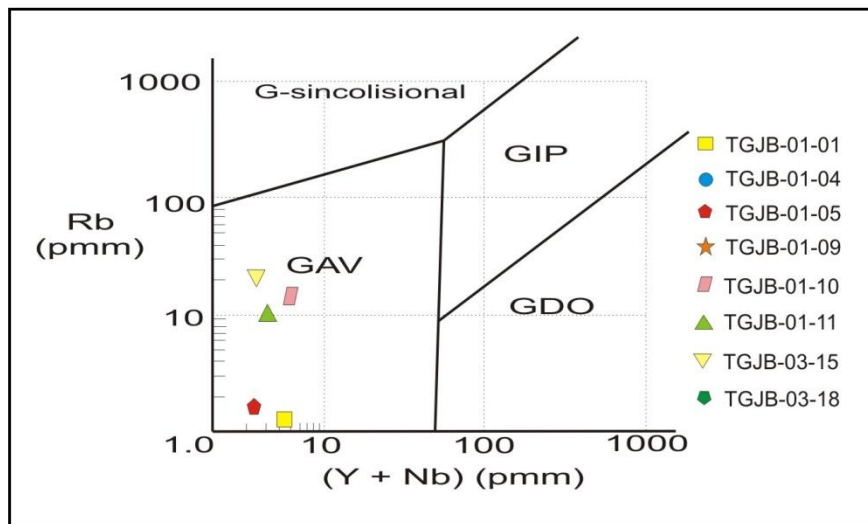


**Figura 59.** Distribución de tierras raras.

En la figura 59 se aprecia que: la anomalía negativa en Nb se pudiera atribuir a magmas de zona de subducción, las anomalías positivas de Ba y U representan la evolución de magmas corticales debido a su grado de incompatibilidad.

#### 4.5.2.1. Determinación del ambiente tectónico

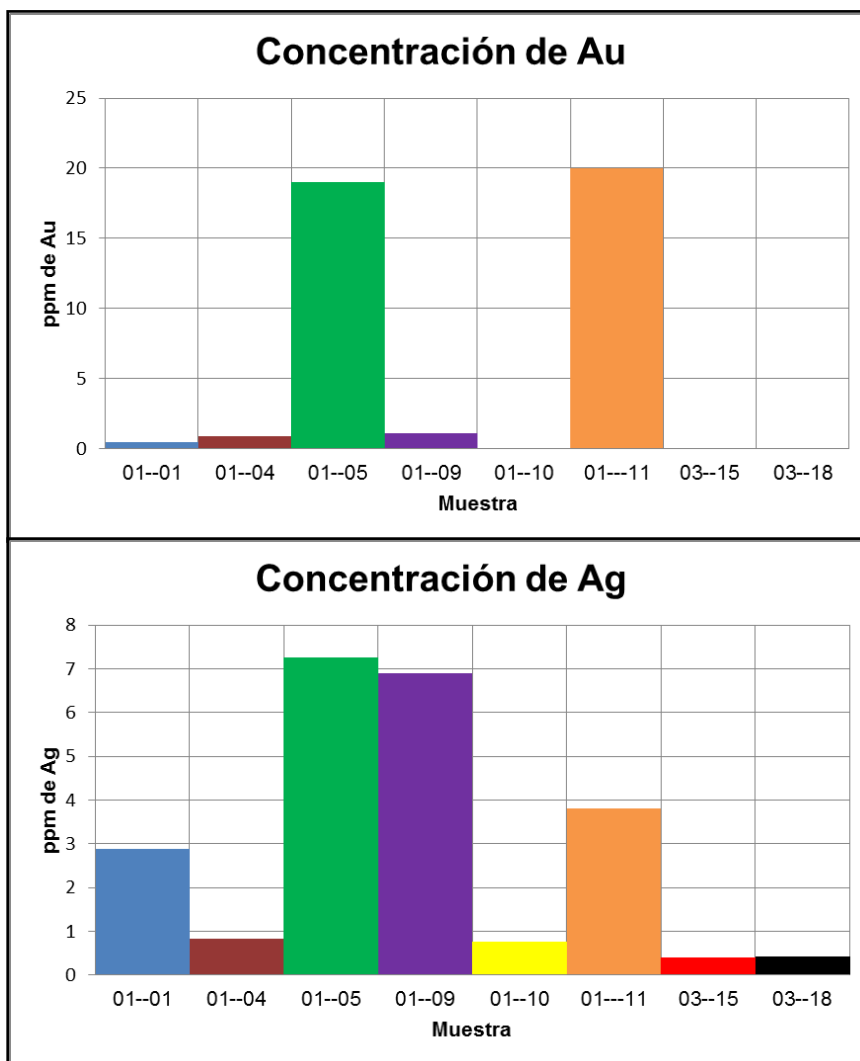
Es posible mediante las variaciones basadas en la cantidad de Rb-Y-Nb hacer una discriminación del ambiente tectónico de formación de rocas (Pearce *et al.*, 1984). La figura 60 muestra un ambiente de formación para granitoides tipo arco volcánico. Éste ambiente es por supuesto el esperado para rocas provenientes de un sistema de arco volcánico como lo son las rocas del sistema cordillerano.



**Figura 60.** Diagrama Rb vs (Y+Nb) para ambientes de rocas graníticas (after Pearce *et al.*, 1984).

#### 4.5.2.2. Metales preciosos

Se observó una alta concentración de Au y Ag (figura 61), en las muestras TGJB-01-05 y TGJB-01-11 respecto a las demás muestras, así como una alta concentración de Ag en la muestra porfírica dentro del núcleo síliceo.

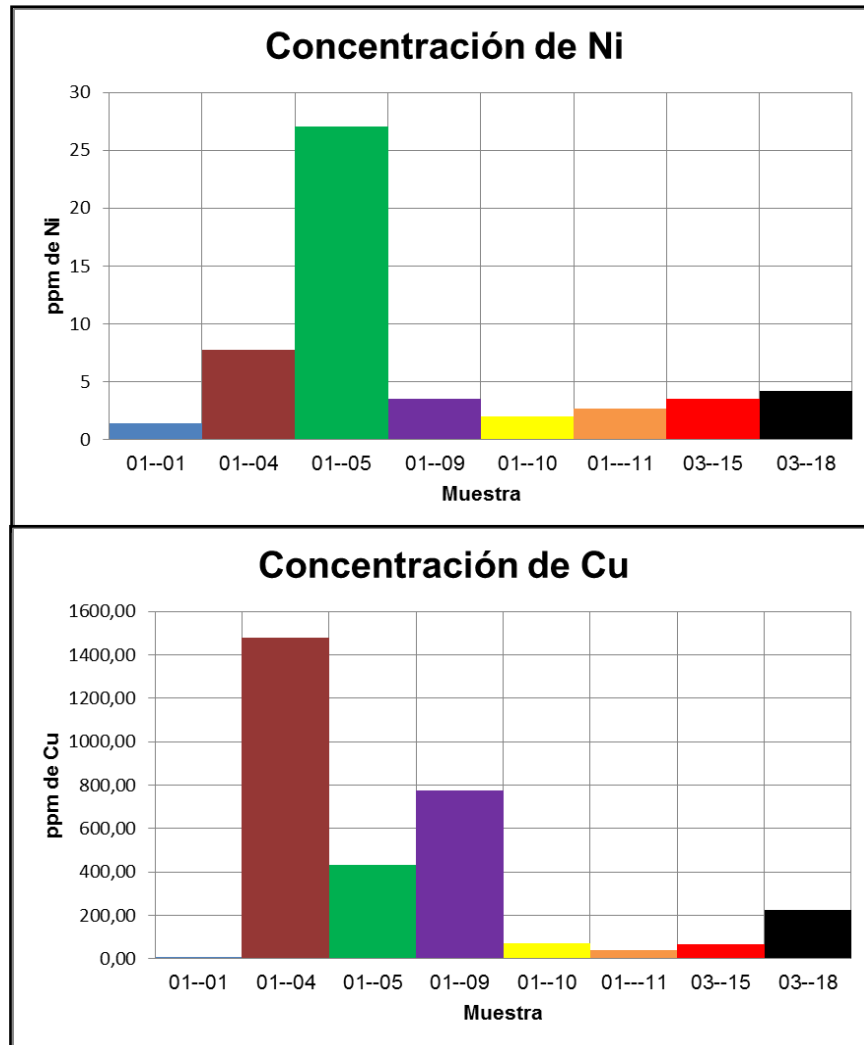


**Figura 61.** Abundancia de Au y Ag.

La muestra 01-05 vuelve a presentar una importante concentración de Ni (figura 62), en cuanto al cobre, se presentan valores altos en la muestra 01-04, así como concentraciones importantes nuevamente en la muestra 01-05 y 01-09.

Es de rescatar que las mayores abundancias de estos metales se dan principalmente en la muestra 01-05 que hace referencia a un relicto encontrado dentro del plutón (ver figura 37), lo que supondría la idea de que la removilización de dichos elementos pudo ser producto de la acción de los paleofluidos y su

posterior alteración, asumiendo que dicho relicto sea parte de la roca original (el cual presenta también niveles de alteración importantes).



**Figura 62.** Abundancia de Ni y Cu.

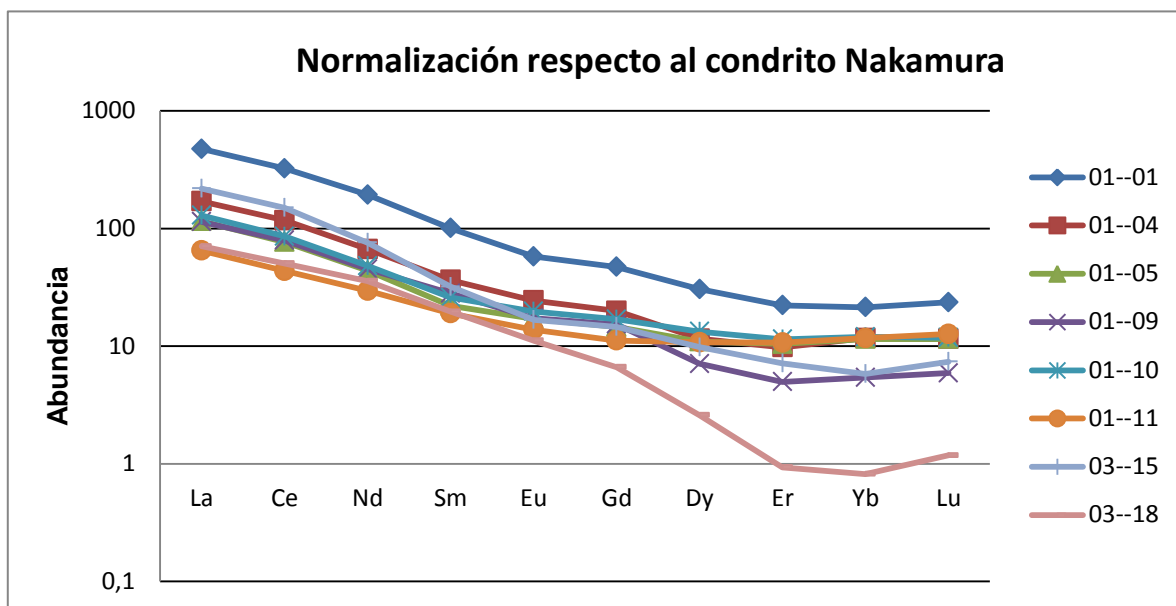
### 4.5.3. REE

La normalización de los valores se hizo respecto al condrito de Nakamura (1974), dividiendo el valor hallado en la muestra entre el valor que registra el condrito. La figura 63 muestra un evidente enriquecimiento en tierras raras ligeras y un empobrecimiento en las pesadas, se observa igualmente una leve anomalía en Eu para las muestra 01-01 y 01-09 y en Yb para la muestra 03-15. Todas las

muestras presentan una concentración de REE relativamente homogénea, con la excepción de la muestra 03-18 que sufre un decaimiento en Dy, y baja aún más en Er manteniéndose luego estable. En el proceso de cristalización fraccionada y diferenciación magmática las REE pesadas tienden a concentrarse en el manto (en piroxenos, anfíboles, granates, etc) mientras que las livianas lo hacen en la corteza (en feldespatos, micas, apatitos, etc), lo anterior explicaría la abundancia de REE ligeras, tratándose de un cuerpo plutónico producto de la fusión de la corteza.

Muestra	TGJB-								Valores del condrito de Nakamura
	01-01	01-04	01-05	01-09	01-10	01-11	03-15	03-18	
<b>La</b>	156,0	55,9	38,0	37,5	42,5	21,3	71,8	23,2	0,3290
<b>Ce</b>	280	101,5	66,4	68,6	74,1	37,7	130,0	43,6	0,8650
<b>Pr</b>	32,2	11,45	7,61	7,65	8,21	4,7	14,00	5,65	
<b>Nd</b>	122,0	42,0	27,6	28,5	30,3	18,6	47,7	22,5	0,6300
<b>Sm</b>	20,4	7,39	4,47	5,71	5,25	3,85	6,50	3,99	0,2030
<b>Eu</b>	4,45	1,88	1,31	1,33	1,52	1,06	1,29	0,86	0,0770
<b>Gd</b>	13,00	5,50	4,02	4,23	4,67	3,08	4,03	1,83	0,2760
<b>Tb</b>	1,94	0,71	0,66	0,50	0,70	0,59	0,63	0,21	
<b>Dy</b>	10,45	3,96	3,75	2,43	4,56	3,70	3,36	0,89	0,3430
<b>Ho</b>	1,90	0,73	0,79	0,39	0,93	0,76	0,65	0,11	
<b>Er</b>	5,00	2,20	2,35	1,12	2,57	2,41	1,61	0,21	0,2250
<b>Tm</b>	0,75	0,33	0,37	0,17	0,42	0,37	0,26	0,03	
<b>Yb</b>	4,70	2,57	2,53	1,19	2,64	2,57	1,28	0,18	0,2200
<b>Lu</b>	0,80	0,39	0,39	0,20	0,40	0,43	0,25	0,04	0,0339
<b>Y</b>	47,8	21,7	22,9	10,4	25,8	21,2	16,6	2,5	

**Tabla 38.** Abundancia de REE. Los datos del condrito usado para la normalización fueron los de Nakamura.



**Figura 63.** Abundancia de REE.

#### 4.6. ESTUDIO DE LAS INCLSIONES FLUIDAS

En primera instancia, se realizó un detallado estudio petrográfico de las inclusiones presentes en cada una de las muestras, en él, se describe las características de los cuarzos que hospedaban las inclusiones, así como las características de cada una de las inclusiones y sus respectivas asociaciones.

##### 4.6.1. Petrografía de las asociaciones de inclusiones fluidas.

Para el estudio petrográfico de las inclusiones fluidas se recurrió al análisis mediante microscopía de luz transmitida, a cada tipo de inclusiones se describen características como: clasificación genética, número de fases, forma, tamaño y grado de relleno; el tamaño que se describe corresponde al largo de la inclusión (eje más largo). Las familias de inclusiones fueron separadas dependiendo del cuarzo en donde estuvieran ubicadas; a su vez estas familias son descritas como

asociaciones de inclusiones fluidas (AIF). Estas asociaciones fueron divididas teniendo en cuenta la clasificación propuesta por Sheppard *et al*, 1985.

**Tipo I:** monofásicas de solo líquido (L)

**Tipo II:** bifásicas de líquido (>50%) más vapor (<50%) (L+V)

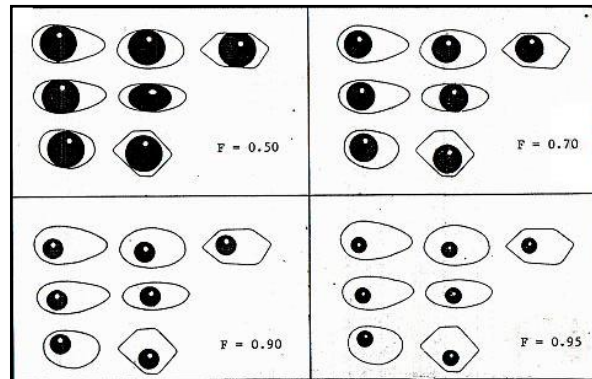
**Tipo III:** bifásicas de vapor (>50%) más líquido (<50%) (V+L)

**Tipo IV:** monofásicas de solo vapor (V)

**Tipo V:** trifásicas de + vapor + solidos (<>50%) (L+V+S)

**Tipo VI:** trifásica de líquidos inmiscibles, líquido 1 + líquido 2 ± vapor ( $L_1+L_2+V$ )

El grado de relleno de las inclusiones bifásicas hace referencia a la relación de fluido y de vapor dentro de la inclusión, Shepherd *et al.*, 1985, propuso una estimas para estos grados de relleno, en dicha estimación fue basado la presente clasificación (figura 64).



**Figura 64.** Estimación de grado de relleno (f) para inclusiones bifásicas, (tomado de Shepherd *et al.*, 1985)

Las siguientes descripciones parten del hecho de que todas las inclusiones analizadas son de origen primario. Para esto, solo fueron seleccionadas las inclusiones que no tuvieron una orientación preferente, aclarando que el hecho de que estén orientadas no las hace de origen secundario. Los colores de interferencia de los minerales de cuarzo en donde se encuentran las inclusiones

no deben ser tomados en cuenta ya que se tratan de secciones delgadas de más de 0,03 mm de espesor.

### **TGJB-01-06**

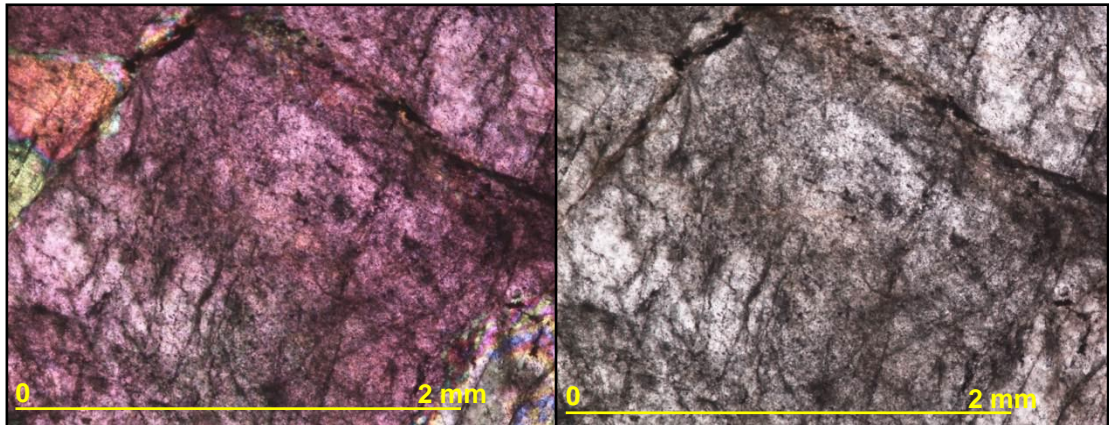
Muestra perteneciente a una vena de cuarzo dentro de una roca granítica



**Figura 65.** Lámina doblemente pulida, con inclusiones distribuidas en toda la muestra.

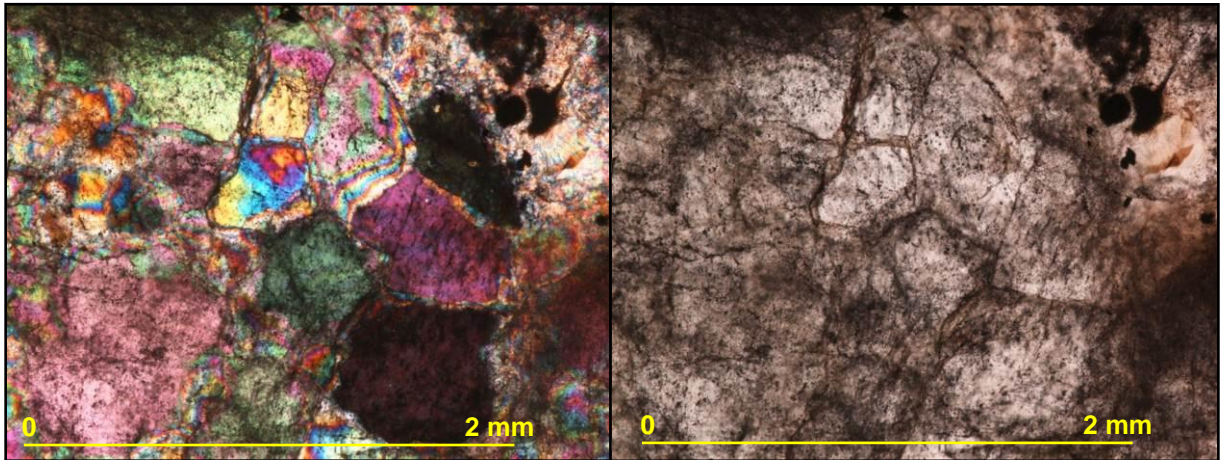
La muestra está compuesta en su totalidad de cuarzo, posee dos tipos de cuarzo que se diferencian en su tamaño y otro más que bajo nicoles cruzados presentan una aparente zonación. La distribución de las inclusiones se da en la totalidad de la muestra.

- **Cuarzo A:** grandes cristales con tamaños mayores a 3 mm, en nicoles paralelos tienen un aspecto bastante turbio y en los bordes de los cristales presentan en ocasiones una zonación, en este cuarzo las inclusiones son muy pequeñas.



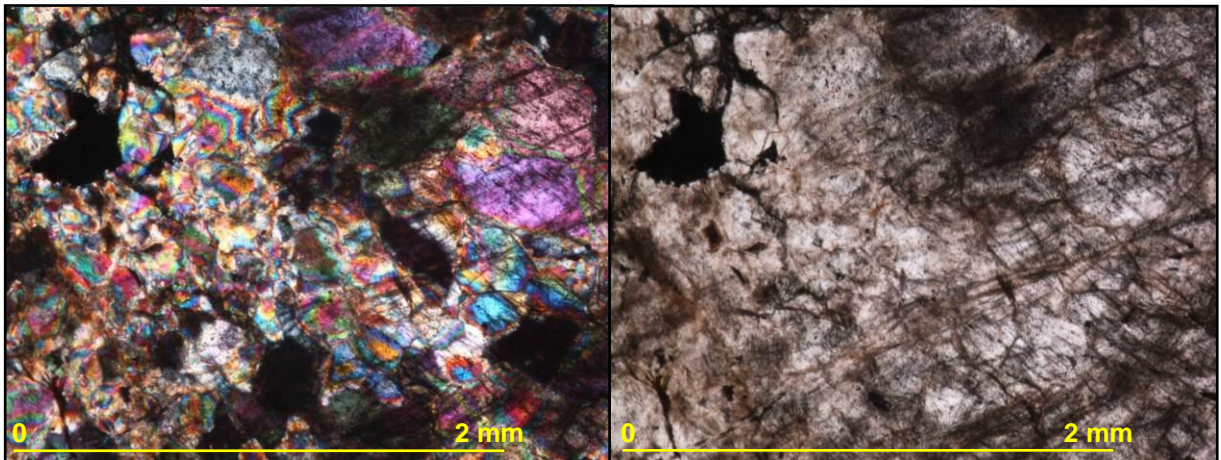
**Figura 66.** Cuarzo A con inclusiones tipo II, III y IV.

- **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo III con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm y un grado de relleno aproximadamente 0,95.
  - **AIF 2:** inclusiones irregulares del tipo IV con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm.
  - **AIF 3:** inclusiones irregulares del tipo II + IV, tienen un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm con un grado de relleno de 0,90 para las tipo II.
  - **AIF 4:** inclusiones irregulares del tipo II + III con tamaños que van de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.015 mm y grados de relleno de 0,90 y 0,20 respectivamente.
  - **AIF 5:** inclusiones irregulares del tipo II con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm y un grado de relleno de 0,90.
- 
- **Cuarzo B:** cristales irregulares claros con un tamaño que va de 0,4 mm a 2 mm, se presentan con un aspecto más limpio que los anteriores.



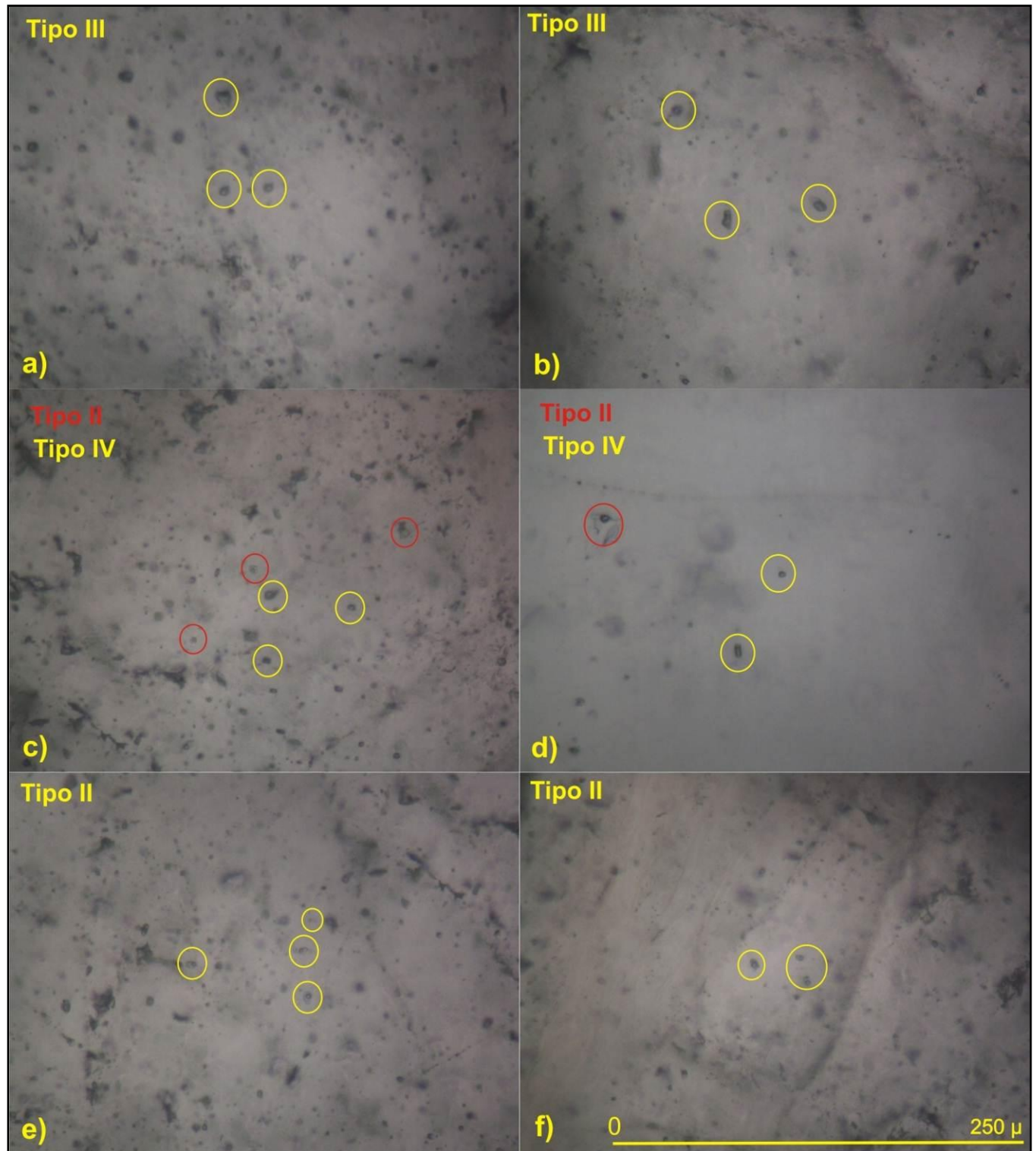
**Figura 67.** Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II y III.

- **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo III con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.015 mm y un grado de relleno de aproximadamente 0,95.
- **AIF 2:** inclusiones irregulares del tipo II + III con un tamaño que va de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.015 mm y grados de relleno de 0,90 y 0,40 respectivamente.
- **AIF 3:** inclusiones irregulares del tipo II con un tamaño de 0.01 mm a 0.02 mm y grados de relleno entre 0,90 y 0,60.
- **Cuarzo C:** pequeños agregados cristalinos de forma irregular con tamaños de 0,1 mm a 0,2 mm, tienen la característica de presentar una zonación cuando son vistos en nicols cruzados.

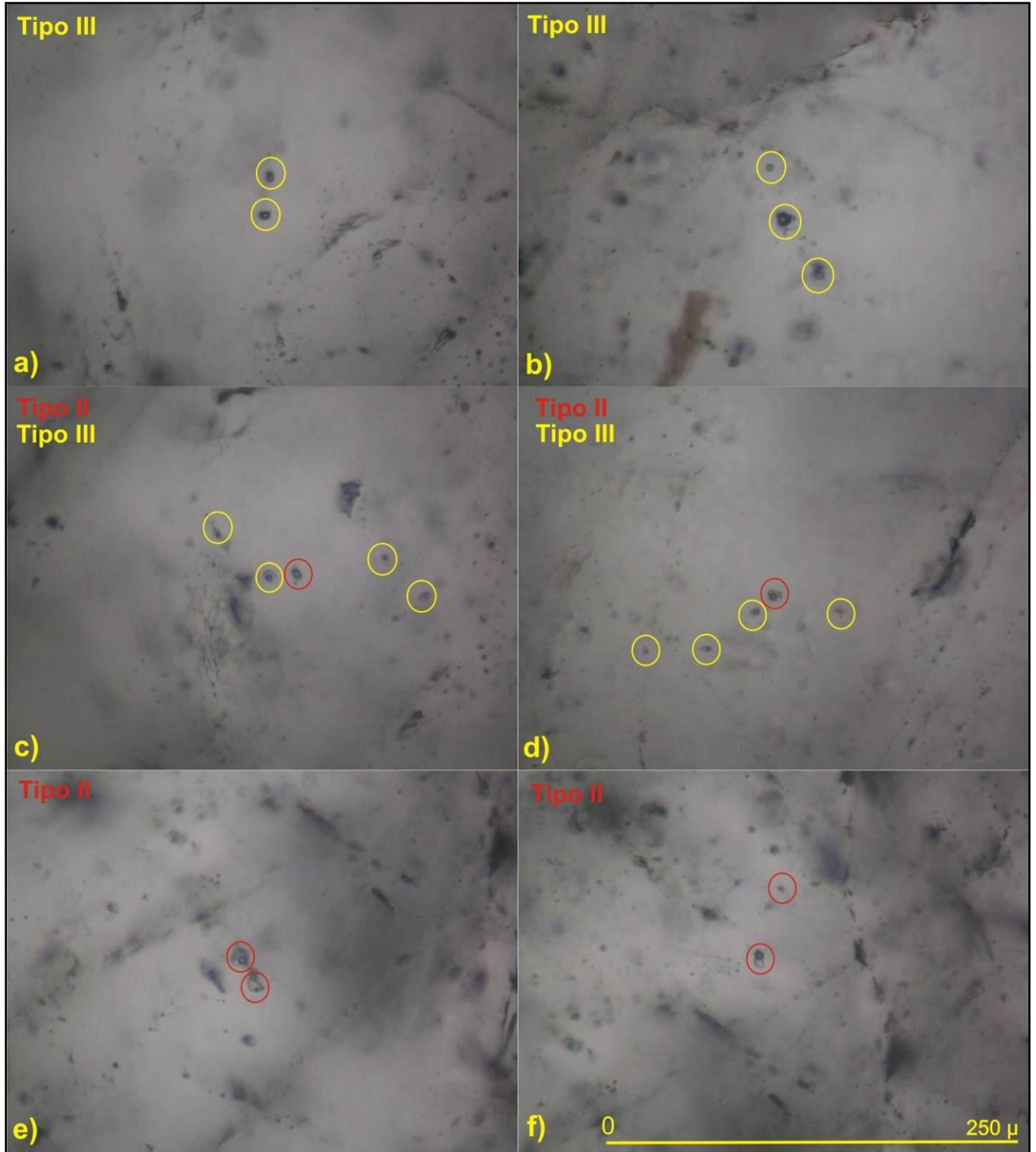


**Figura 68.** Cuarzo C con inclusiones tipo I, II y III.

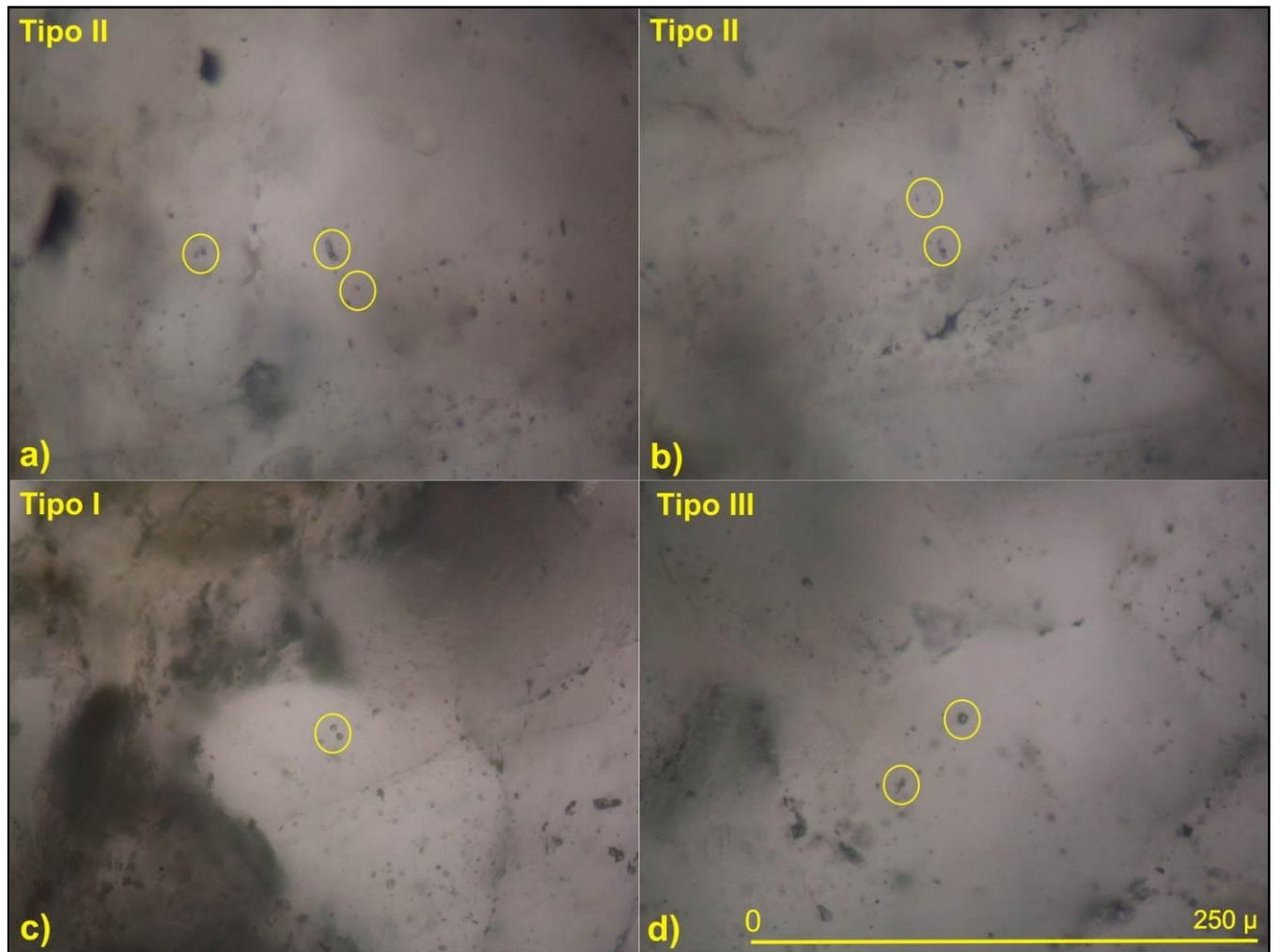
- **AIF 1:** pequeñas inclusiones irregulares y alargadas del tipo II, tienen un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm y poseen un grado de relleno de 0,50 y 0,60.
- **AIF 2:** inclusiones irregulares del tipo I con un tamaño de aproximadamente  $2.5 \times 10^{-3}$  mm.
- **AIF 3:** inclusiones irregulares del tipo III con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm y un grado de relleno de 0,10.



**Figura 69.** Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo A. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 3; e y f, AIF 5).



**Figura 70.** Inclusiones tipos II, III en cuarzo B. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 2; e y f, AIF 3).



**Figura 71.** Inclusiones tipos I, II y III en cuarzo C. (a y b, AIF 1; c, AIF 2; d, AIF 3).

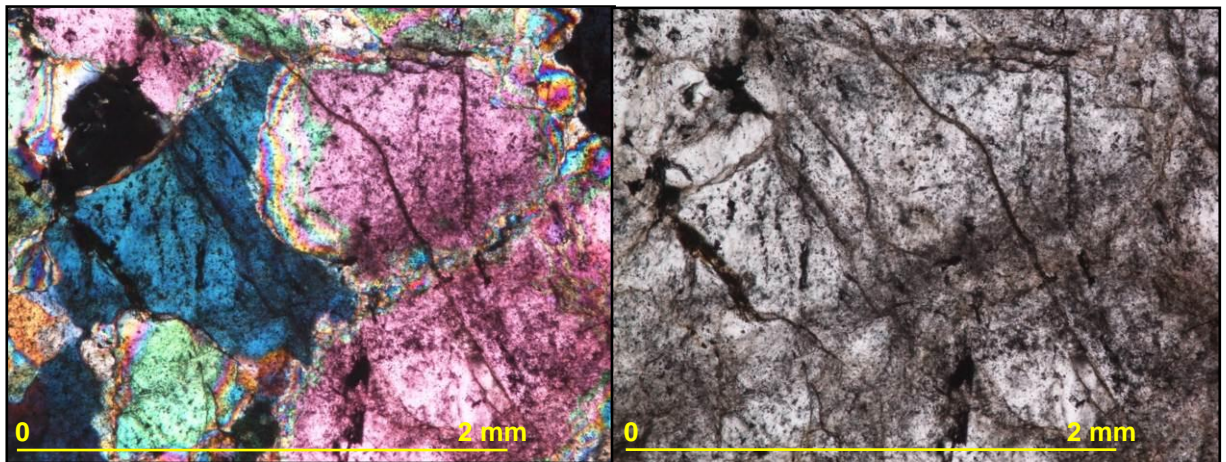
### TGJB-01-07

Muestra perteneciente al núcleo silíceo.



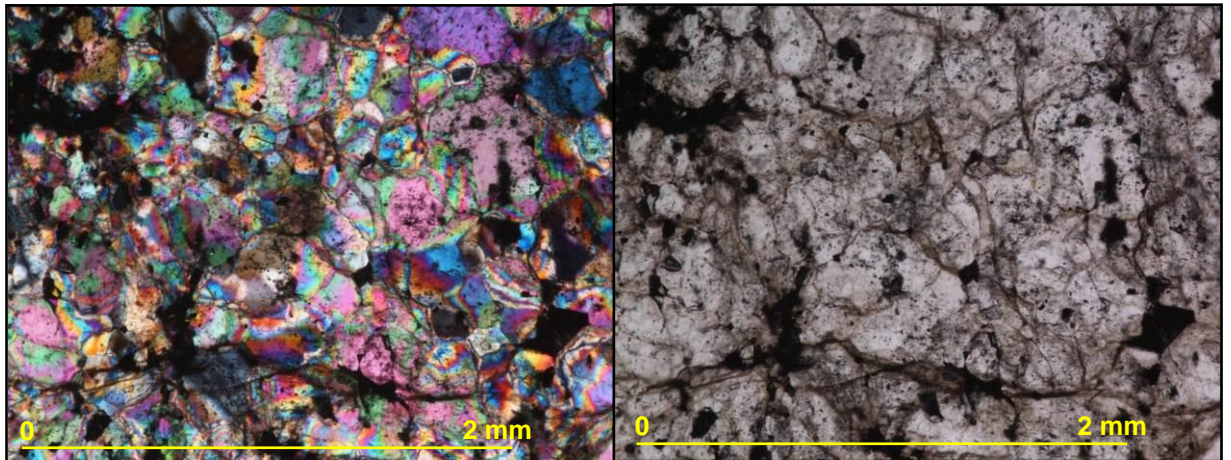
**Figura 72.** Lámina doblemente pulida con inclusiones distribuidas en toda la muestra.

- **Cuarzo A:** cristales irregulares con un aspecto claro en nicoles paralelos y con un tamaño de los cristales que va de 0,3 mm a 1,6 mm, se observan en ocasiones muy fracturados



**Figura 73.** Cuarzo A hospedando inclusiones tipo I, II, III y IV. (nicos cruzados y nicos paralelos).

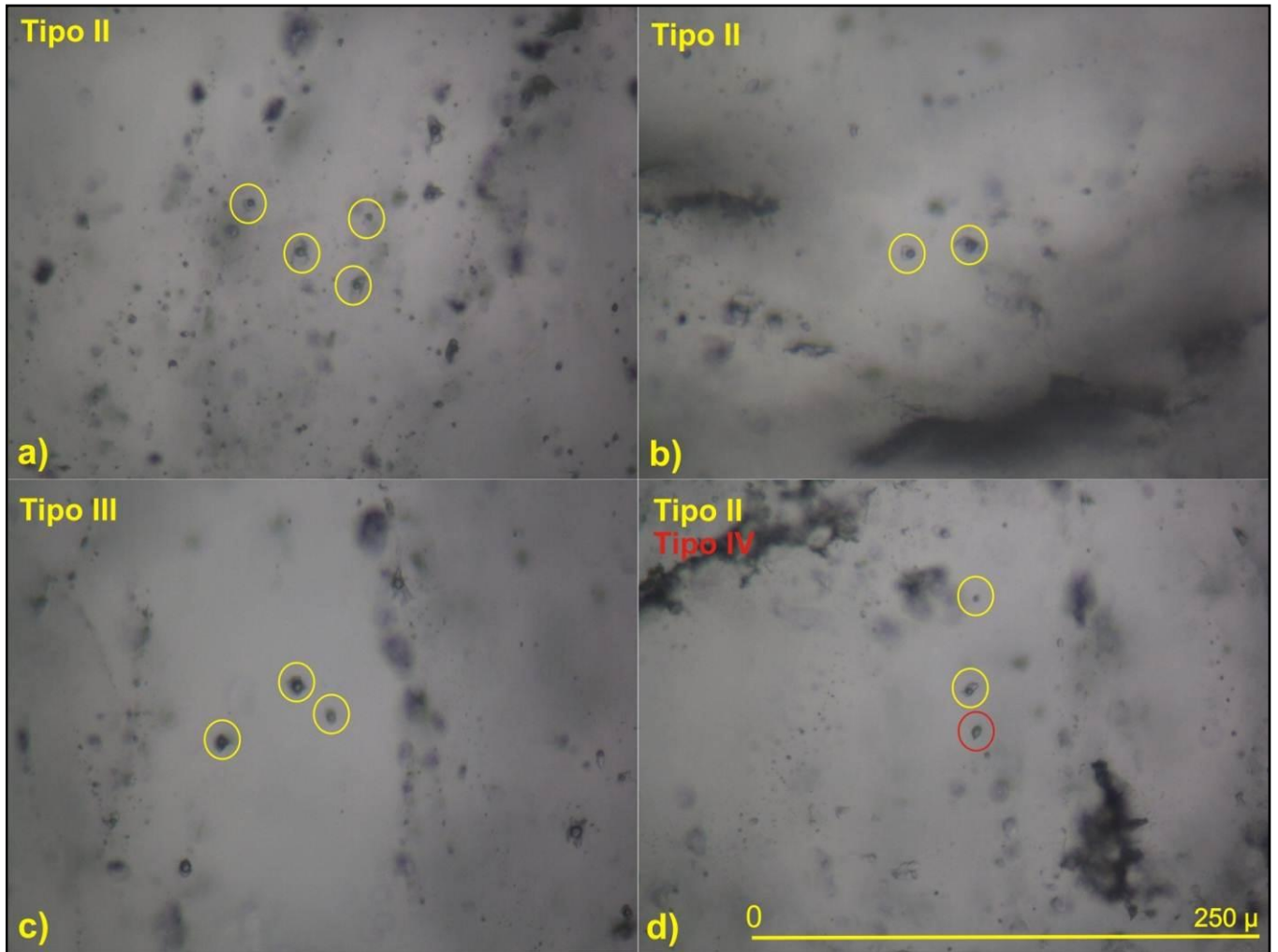
- **AIF 1:** inclusiones irregulares y ovaladas tipo II con un tamaño que van de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm, el grado de relleno de estas inclusiones es de aproximadamente 0,70.
  - **AIF 2:** grandes inclusiones irregulares tipo III con un tamaño de aproximadamente 0.0175 mm, el grado de relleno va de 0,30 a 0,40.
  - **AIF 3:** inclusiones con formas irregulares, monofásicas tipo I (L), con un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm.
  - **AIF 4:** inclusiones irregulares del tipo II + IV, tienen un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm y un grado de relleno 0,60.
- **Cuarzo B:** pequeños agregados cristalinos de forma irregular, con un tamaño que va de 0,06 mm a 0.2 mm.



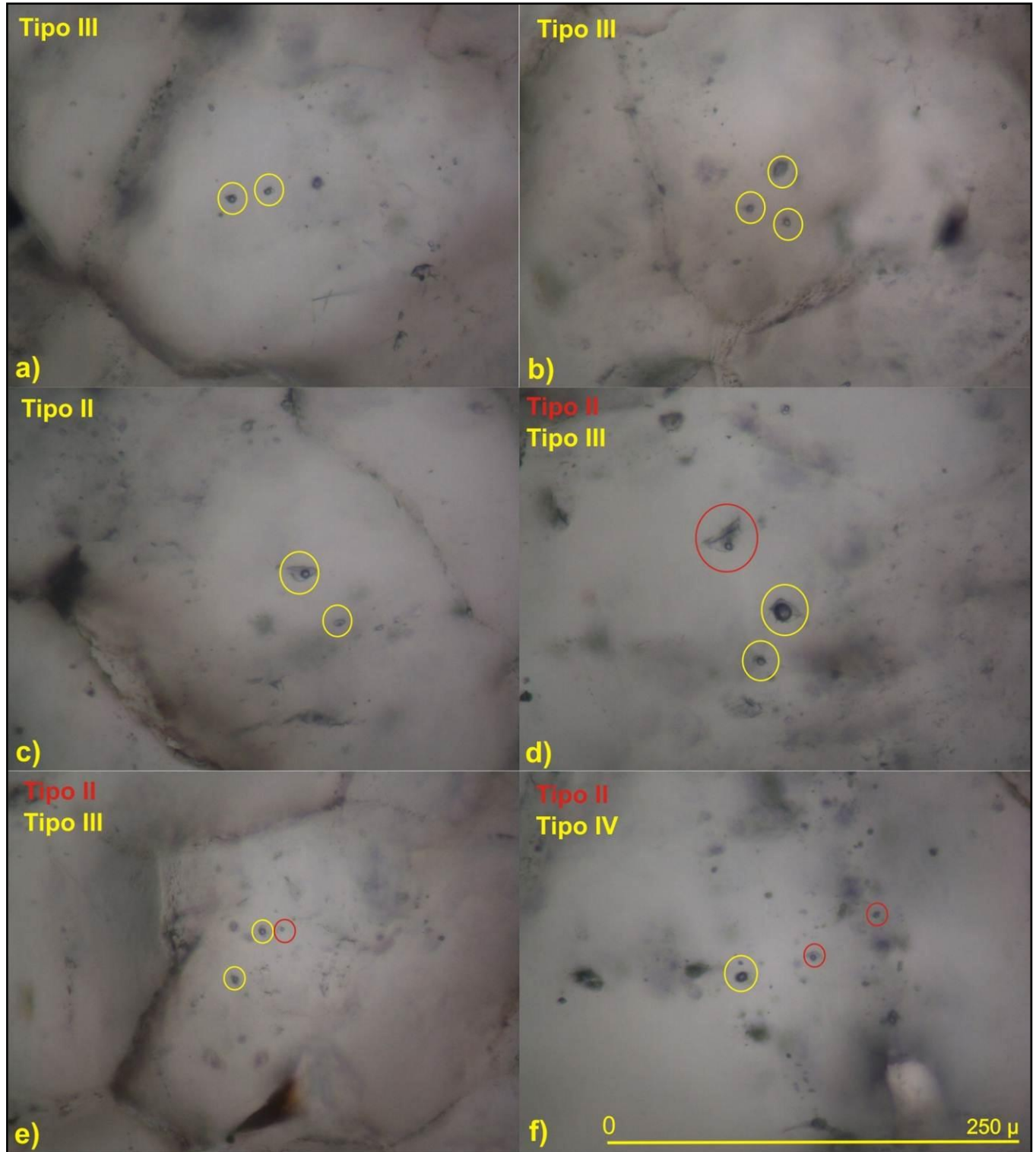
**Figura 74.** Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II, III y IV. (nicos cruzados y nicos paralelos).

- **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo III, con un tamaño de 0.01 mm a 0.015 y un grado de relleno de 0,20 aproximadamente.

- **AIF 2:** inclusiones irregulares y ovoides tipo II con tamaños que van de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.015 mm y un grado de relleno de 0,50 a 0,90.
- **AIF 3:** inclusiones irregulares tipo II y III con un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm, los grados de relleno son de 0,90 y 0,20 respectivamente.
- **AIF 4:** inclusiones irregulares tipo IV y II con tamaños de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm, con un grado de relleno de 0,80 para las tipo II.



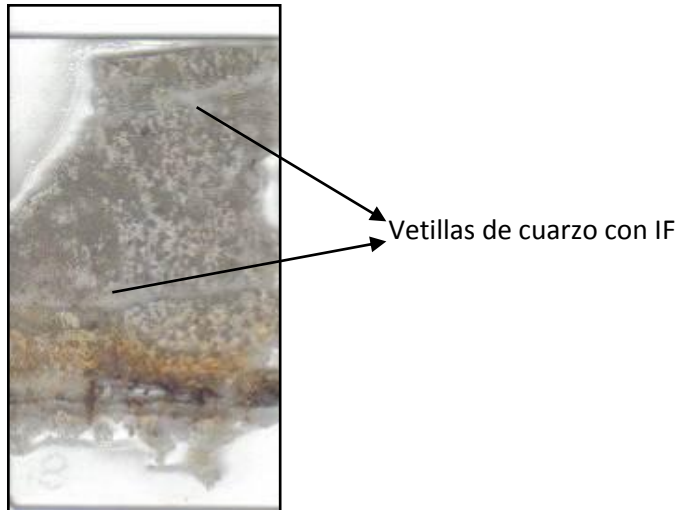
**Figura 75.** Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo A. (a y b, AIF 1; c, AIF 2; d, AIF 4).



**Figura 76.** Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo B. (a y b, AIF 1; c, AIF 2; d y e, AIF 3; f, AIF 4).

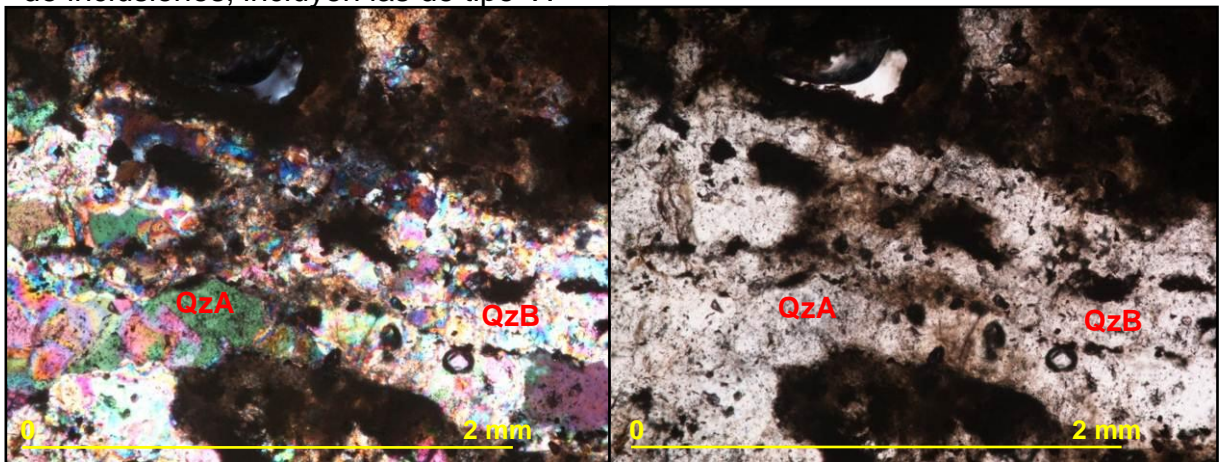
### TGJB-02-12

Esta muestra pertenece a una roca granita (porfido), las venas son de cuarzo y se dan a manera de sheet veins.



**Figura 77.** Lámina doblemente pulida con inclusiones en la vetillas de cuarzo.

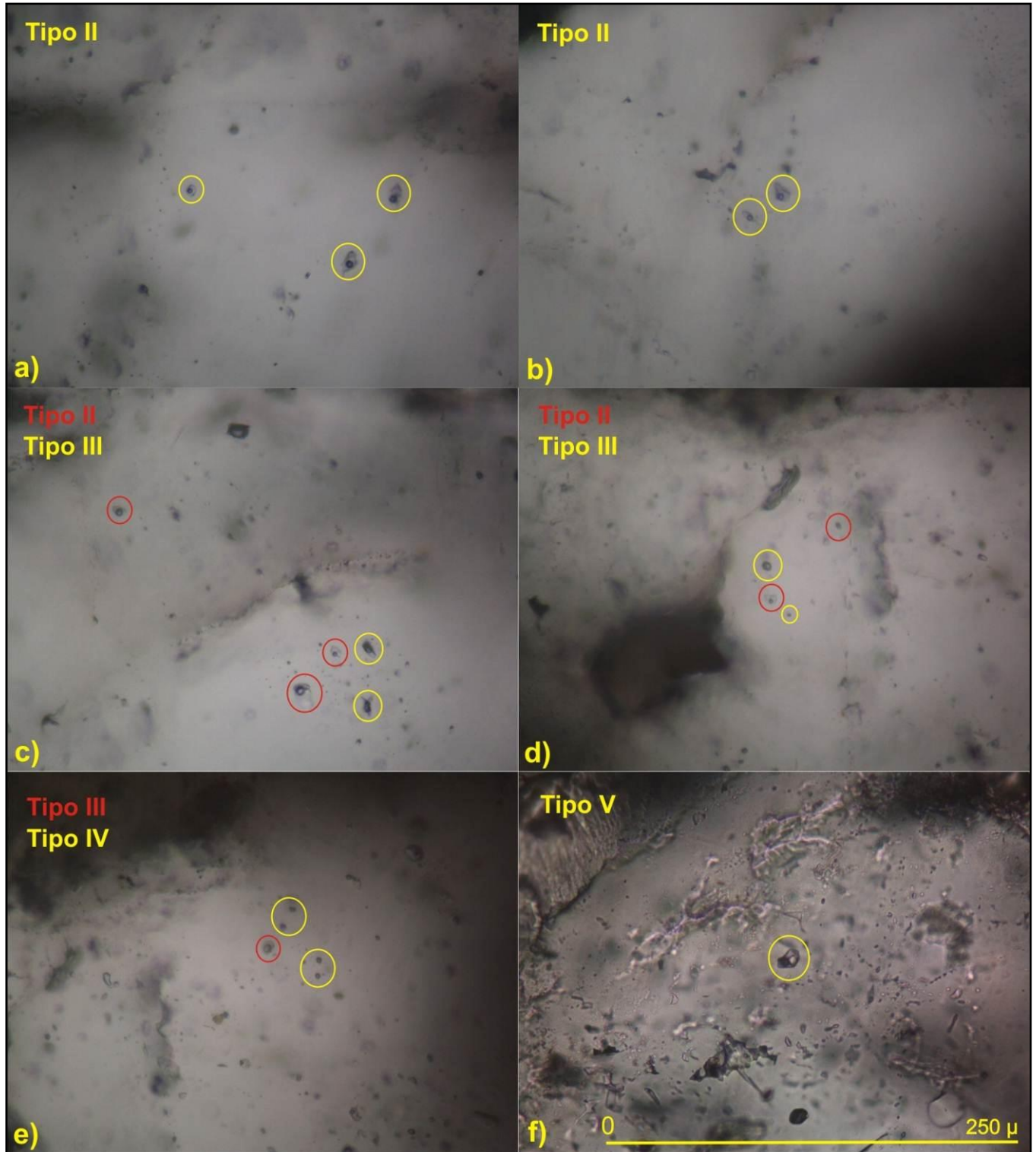
Se observan dos tipos de cuarzos presentes en las dos venillas descritas, estos cuarzos son diferenciados solo por su tamaño de grano, presentan gran cantidad de inclusiones, incluyen las de tipo V.



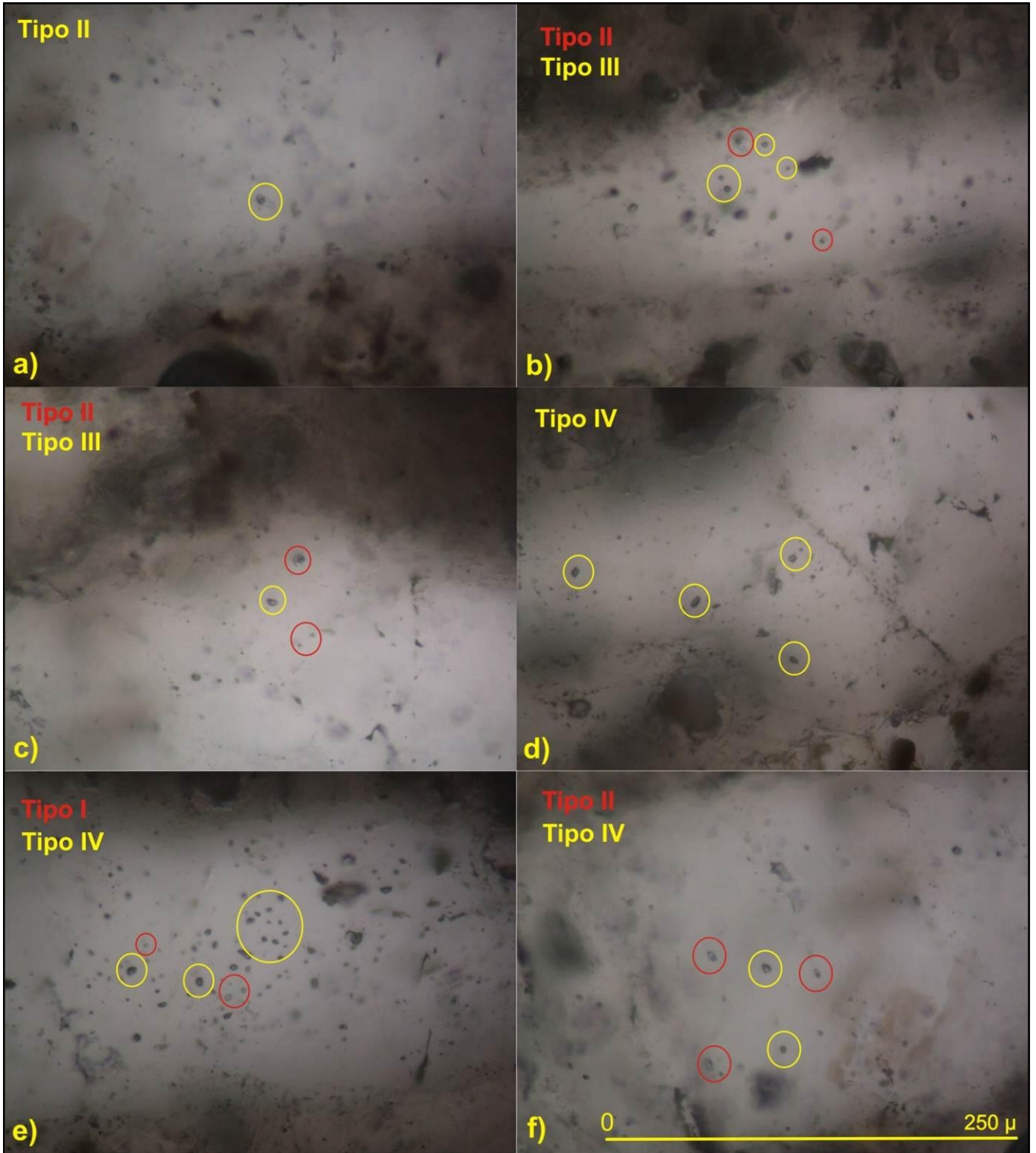
**Figura 78.** Cuarzo A con inclusiones tipo II, III, IV y V, y cuarzo B con inclusiones tipo II, III y IV. (nicos cruzados y nicos paralelos).

- **Cuarzo A:** cristales de color claro, en paralelos muestran un aspecto bastante limpio y tienen un tamaño de 0,2 mm a 0,3 mm.
  - **AIF 1:** inclusiones ovoides e irregulares del tipo II, con un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm, tienen un grado de relleno de 0,70 a 0,90.
  - **AIF 2:** inclusiones irregulares tipos II + III, tienen un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0225 mm y poseen un grado de relleno de 0,90 y 0,10 respectivamente.
  - **AIF 3:** inclusiones regulares e irregulares del tipo III con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.02 mm y un grado de relleno de 0,05 y 0,15.
  - **AIF 4:** inclusiones irregulares del tipo I + II con un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm y un grado de relleno de 0,90 para las tipo II.
  - **AIF 5:** inclusiones irregulares del tipo III + IV, tienen un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm y un grado de relleno de 0,20 para las tipo III.
  - **AIF 6:** inclusiones irregulares del tipo V con un tamaño aproximado de 0.0225 mm y un grado de relleno de 0,70.
  
- **Cuarzo B:** pequeños agregados cristalinos con un tamaño de 0,04 mm a 0,1 mm, su aspecto en nicoles paralelos es más sucio que el cuarzo A.
  - **AIF 1:** inclusiones irregulares tipo II con un tamaño que va de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm y un grado de relleno de aproximadamente 0,90.
  - **AIF 2:** inclusiones irregulares tipos II + III, con tamaños que van de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm y grados de relleno de 0,80 y 0,10.
  - **AIF 3:** inclusiones irregulares del tipo IV, con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm.
  - **AIF 4:** inclusiones irregulares del tipo I + IV con tamaños de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm (rara vez vistas en las demás muestras).

- **AIF 5:** inclusiones irregulares del tipo II + IV con tamaños que van de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.01 mm, tienen un grado de relleno de 0,90 para las tipo II.



**Figura 79.** Inclusiones tipos II, III, IV y V en cuarzo A. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 2; d, AIF 5; f, AIF 6).



**Figura 80.** Inclusiones tipos I, II, III y IV en cuarzo B. (a, AIF 1 b y c, AIF 2; d, AIF 3; e, AIF 4; f, AIF 5).

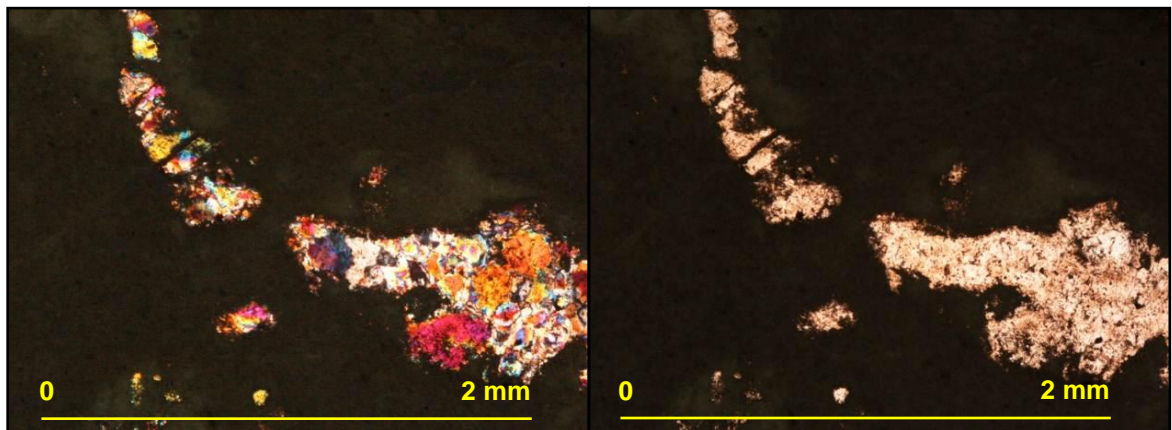
### TGJB-02-14

Muestra del xenolito de cuarzo (cuarzo joven), solo se logran ver inclusiones en un área muy pequeña de la muestra donde el cuarzo es mucho más transparente, lo que muestra ser un cuarzo posterior al que lo hospeda.



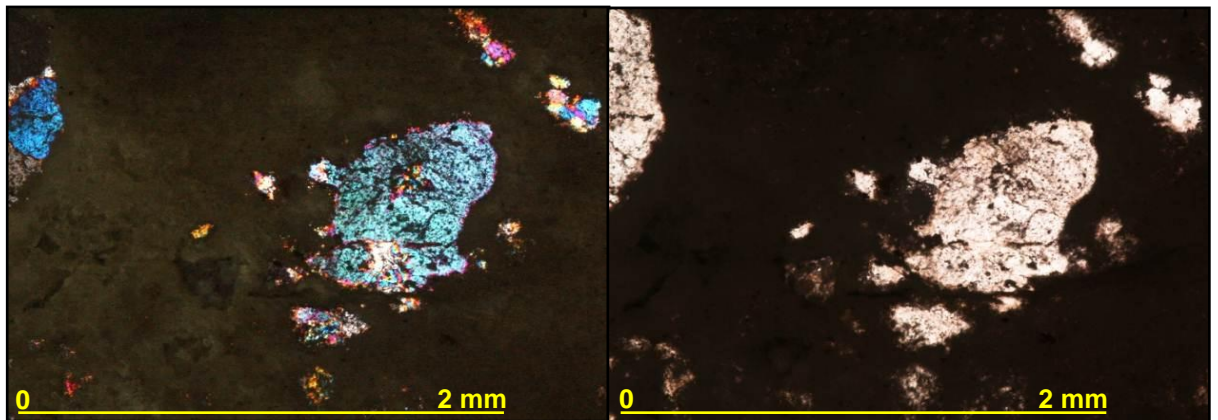
**Figura 81.** Lamina doblemente pulida (en rojo ubicación de la IF).

- **Cuarzo A:** pequeños cristales irregulares de cuarzo de aspecto sucio en nicols paralelos, con un tamaño que va de 0,03 mm a 0,08 mm. Las inclusiones en estos cristales son considerablemente más pequeñas que las que se encuentran en el Cuarzo B.



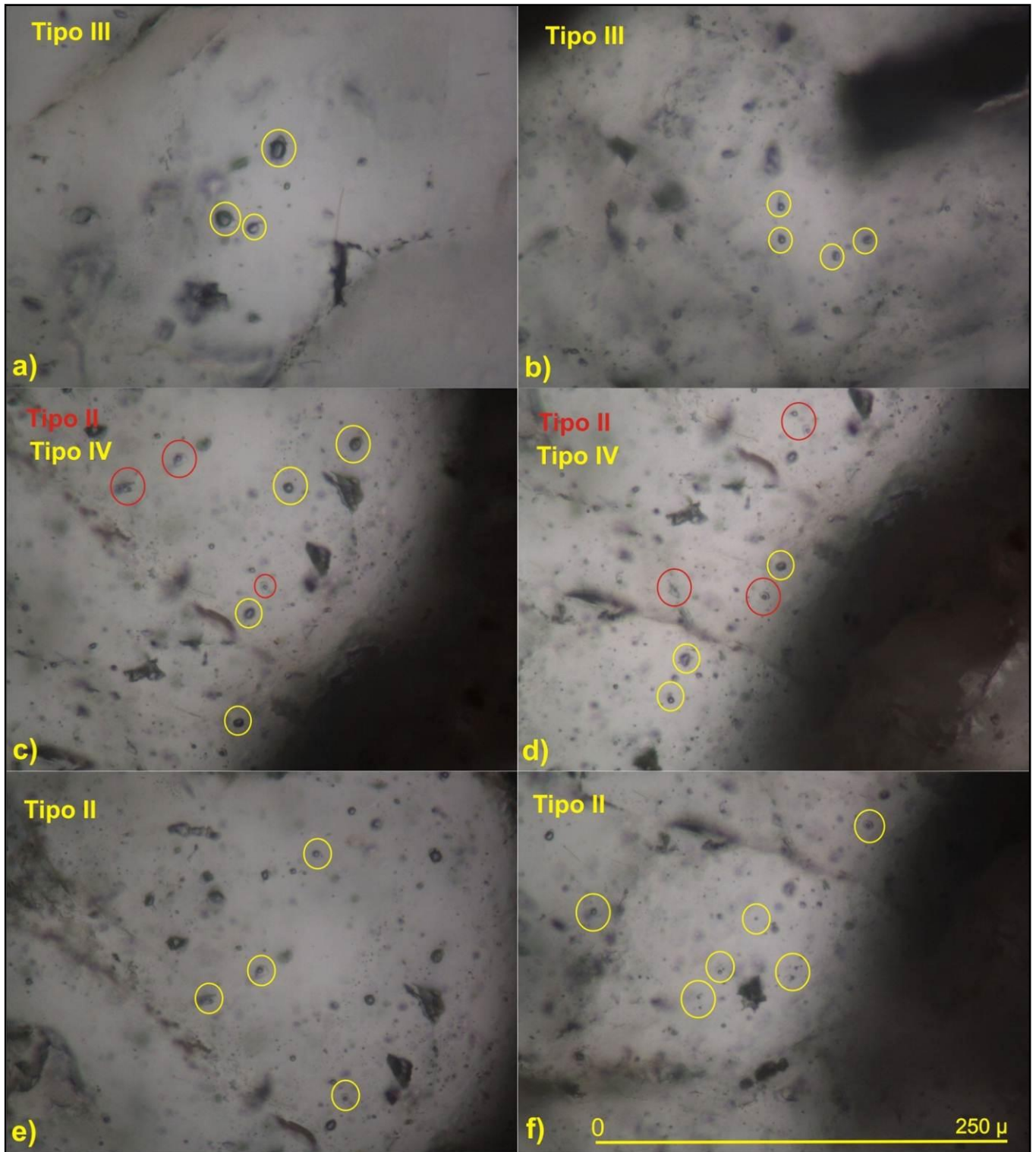
**Figura 82.** Cuarzo A con pocas inclusiones tipo I. (nicols cruzados y nicols paralelos).

- **AIF 1:** inclusiones irregulares y ovoides tipo I (L) con un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm. Se observan inclusiones tanto primarias como secundarias (inclusiones con una alineación preferente).
- **Cuarzo B:** cristales irregulares con un aspecto sucio en nicoles paralelos con un tamaño de 0,2 mm a 1 mm, este cuarzo es muy escaso en la muestra



**Figura 83.** Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II y III. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).

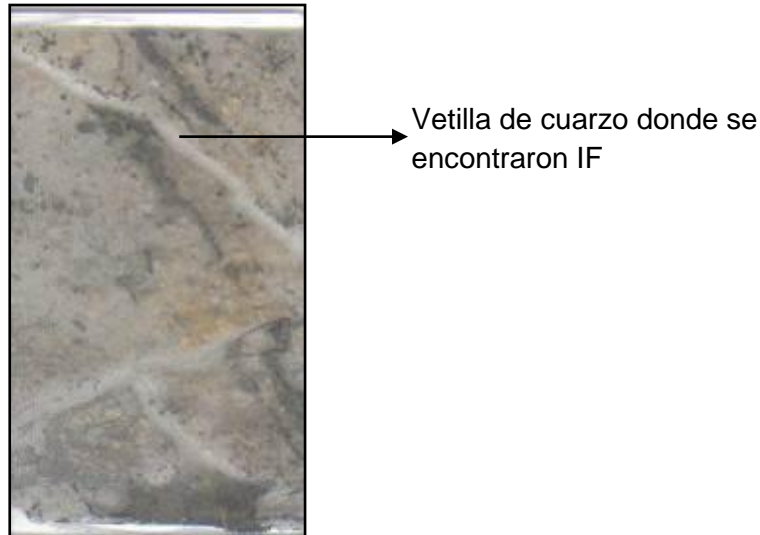
- **AIF 1:** inclusiones ovoides del tipo III (V+L), con un tamaño de aproximadamente 0,0125 mm y con un grado de relleno de 0.10 a 0.40.
- **AIF 2:** inclusiones con formas irregulares tipo II (L+V) mas tipo IV con tamaños que van de 0,01 a 0,015 mm, el grado de relleno para las tipo II va desde 0,60 hasta 0,95.
- **AIF 3:** inclusiones con formas irregulares tipo II con un tamaños de 0,01 mm a 0,015 mm y grados de relleno de 0,90.
- **AIF 4:** inclusiones con irregulares tipo II y I con tamaños de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,001 mm, con un grado de relleno para las tipo II de 0,70 y 0,60.



**Figura 84.** Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo B. (a y b, AIF 1; c y d, AIF 2; e y f, AIF 3).

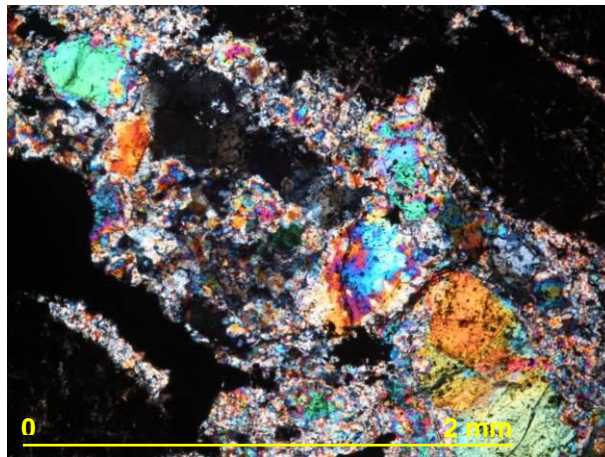
**TGJB-03-17**

Muestras de granitoide rico en cuarzo con vetillas de cuarzo y de cuarzo+pirita.



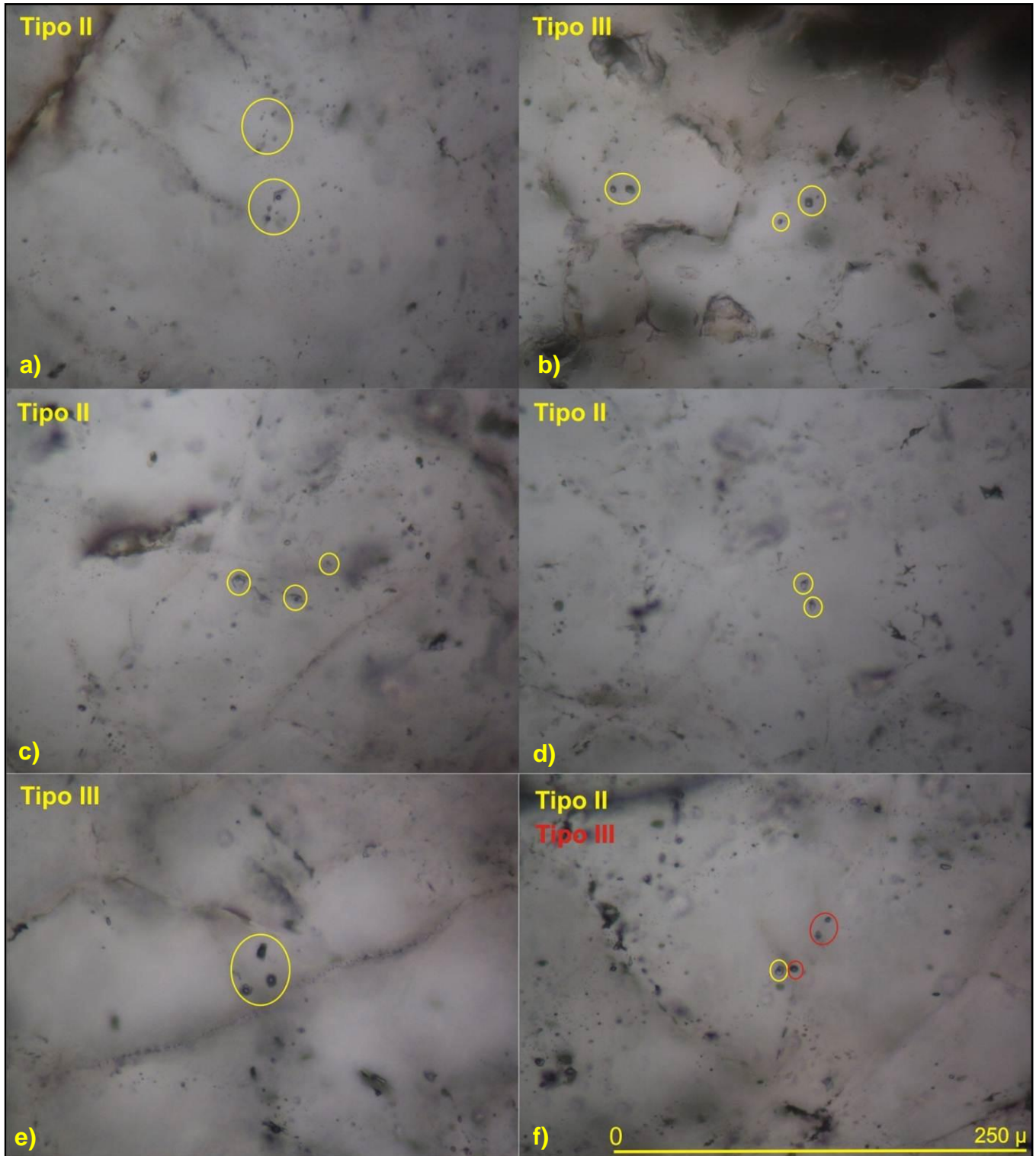
**Figura 85.** Lámina doblemente pulida. Vetillas de cuarzo dentro de cuerpo granítico rico en cuarzo.

Dos tipos de cuarzo se encontraron en esta muestra, se diferencian en el tamaño de los cristales.



**Figura 86.** Cuarzo A y B con inclusiones tipo I, II y III. (nicoses cruzados).

- **Cuarzo A:** cuarzo de color claro, bastante limpio con un tamaño de los cristales que va de 0,08 mm a 0,2 mm
  - **AIF 1:** inclusiones irregulares y ovaladas tipo II con un tamaño que van de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm, el grado de relleno de estas inclusiones es de entre 0,80 Y 0,90 algunas inclusiones muy pequeñas presentan un movimiento conocido como agitación browniana, que hace que la burbuja se mueva dentro del líquido.
  - **AIF 2:** inclusiones irregulares y regulares tipo III con un tamaño de aproximadamente  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $5 \times 10^{-3}$  mm, el grado de relleno va de entre 0,20 a 0,40.
  - **AIF 3:** inclusiones con formas irregulares, monofásicas tipo I (L), con un tamaño de aproximadamente  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $5 \times 10^{-3}$  mm.
  
- **Cuarzo B:** cristales claros, con una textura limpia y un tamaño de 0,3 a 0,8 mm.
  - **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo II, con un tamaño de 0,01 mm a 0,02 mm y con un grado de relleno de 0,95 a 0,80, también presentan agitación browniana.
  - **AIF 2:** inclusiones irregulares y ovoides tipo I con tamaños que van de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $5 \times 10^{-3}$  mm.
  - **AIF 3:** inclusiones irregulares tipo III con un tamaño de aproximadamente  $7.5 \times 10^{-3}$  mm.
  - **AIF 4:** inclusiones irregulares tipo II y III con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm y con un grado de relleno de aproximadamente 0,90 para las tipo II y 0,40 para las tipo III.



**Figura 87.** Inclusiones tipos II, III y IV en cuarzo A. a) AIF 1; b) AIF y cuarzo B. c) AIF 1; d) AIF 3; e) y f) AIF 3.

TGJB-03-19

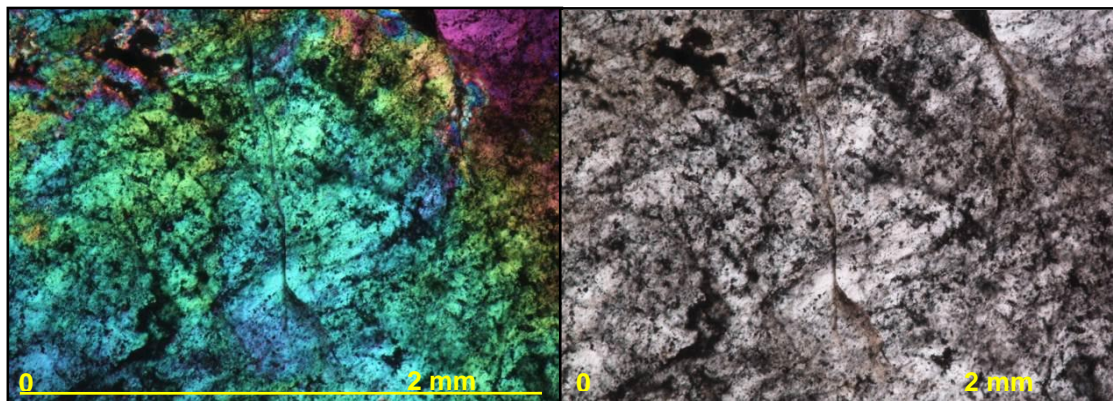
Muestra de vena de cuarzo dentro de granitoide



**Figura 88.** Lámina doblemente pulida con inclusiones distribuidas en toda la muestra.

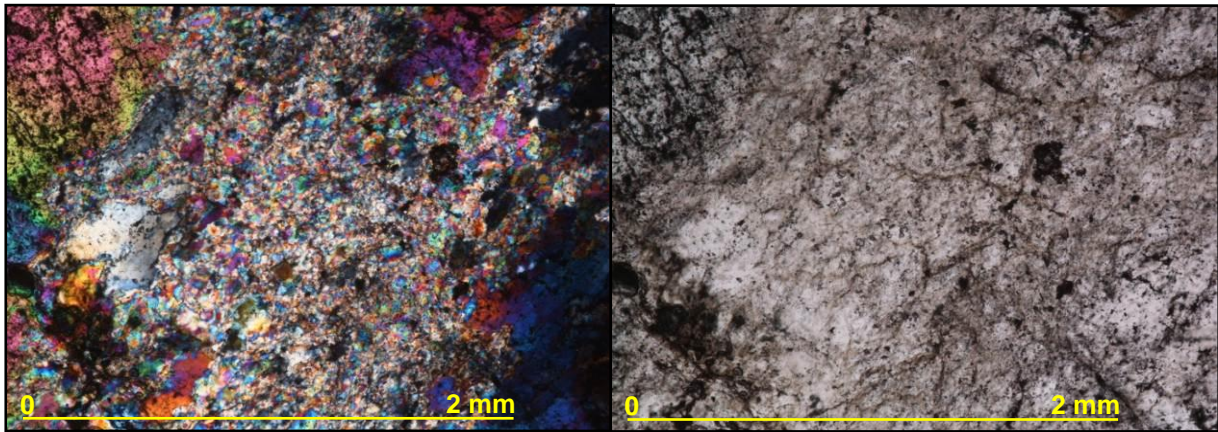
Es la muestra que posee las inclusiones de mayor tamaño. Estas inclusiones se dan en toda la muestra sin una orientación aparente

- **Cuarzo A:** grandes cristales con tamaños que van de 1.5 mm hasta más de 3 mm, contienen muchísimas inclusiones en toda la extensión de los cuarzos. Presenta inclusiones con minerales hijo además de una inclusión que muestra la presencia de dos cristales de halita en una misma inclusión.



**Figura 89.** Cuarzo A con inclusiones tipo I, II, III, IV y V. (nicos cruzados y nicos paralelos).

- **AIF 1:** inclusión irregular del tipo V (L+V+S+S'), tiene un tamaño de 0,02 mm, es muy rara, solo se presenta en esta muestra y tan solo una vez.
  - **AIF 2:** grandes inclusiones irregulares del tipo II + III, con un tamaño de 0,0125 mm a 0,0225 mm y grados de relleno de 0,50 y 0,30 respectivamente.
  - **AIF 3:** inclusiones irregulares del tipo II con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm y un grado de relleno de aproximadamente 0,70.
  - **AIF 4:** inclusiones irregulares del tipo IV con un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm.
  - **AIF 5:** inclusiones irregulares del tipo II + IV con tamaños de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm y un grado de relleno de aproximadamente 0,90.
  - **AIF 6:** inclusión irregular del tipo V con un tamaño de 0,0225 mm.
  - **AIF 7:** inclusiones irregulares del tipo I con un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm.
- **Cuarzo B:** pequeños agregados de cuarzo de forma irregular, con un tamaño aproximadamente de 0,02, posee inclusiones muy pequeñas.

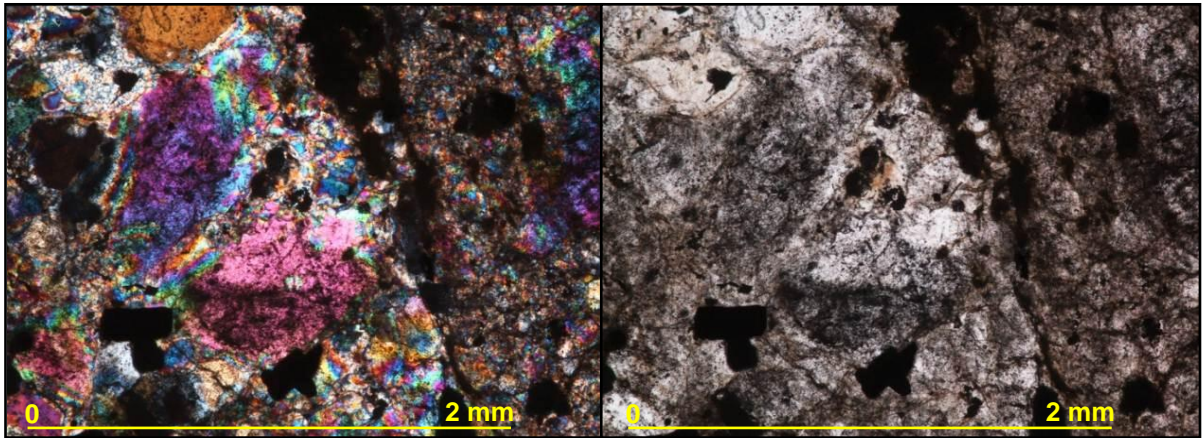


**Figura 90.** Cuarzo B con inclusiones I y II. (nicoses cruzados y nicoses paralelos).

- **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo II con un tamaño que va de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm, tienen un grado de relleno de aproximadamente 0,60.

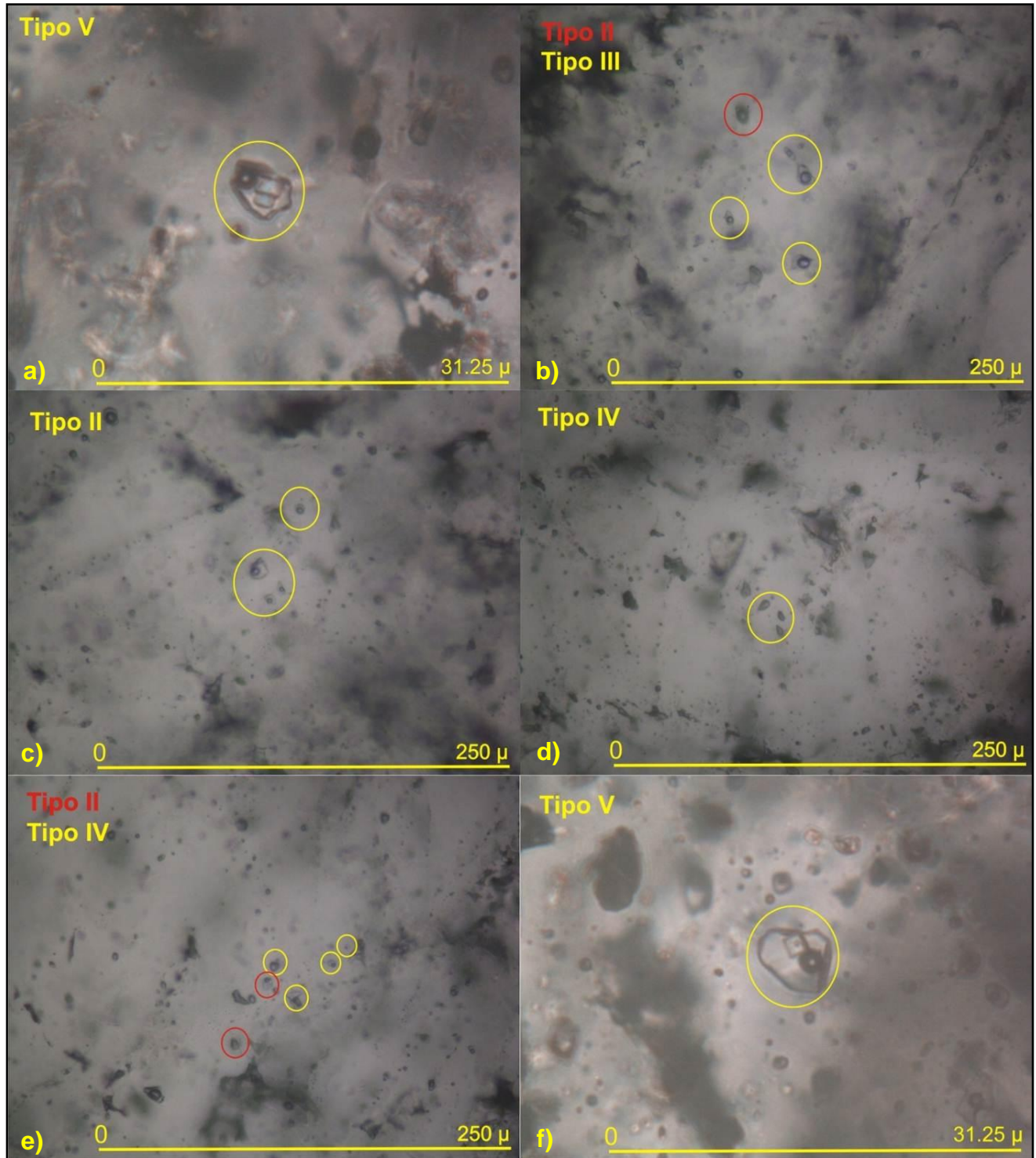
➤ **AIF 2:** Inclusiones irregulares del tipo I con tamaños de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm.

- **Cuarzo C:** cristales irregulares con un tamaño de 0,5 mm a 1 mm, en nicoles paralelos se muestran con un aspecto bastante sucio.

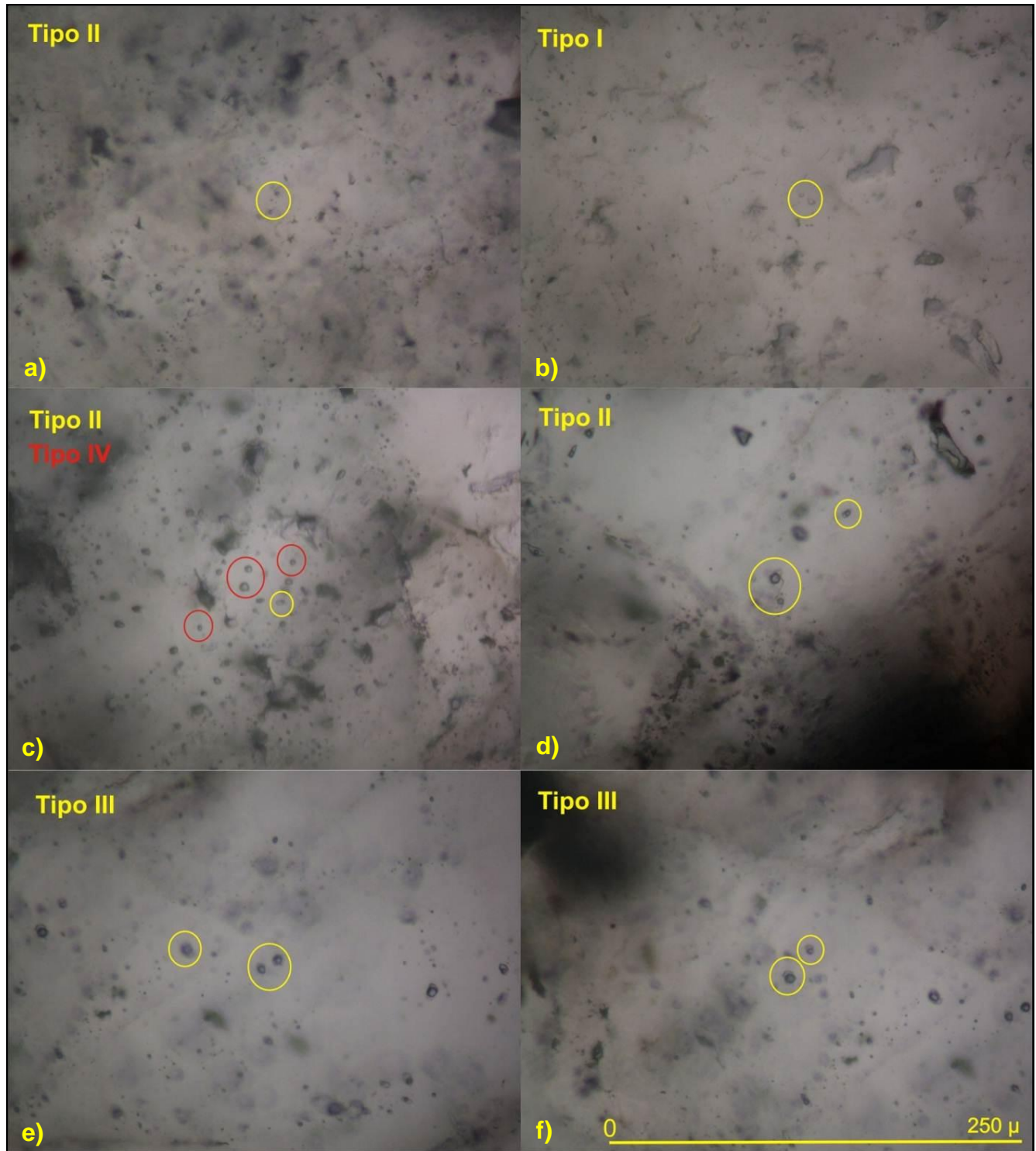


**Figura 91.** Cuarzo C con inclusiones tipo II, III, IV y V. (nicos cruzados y nicos paralelos).

- **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo II + IV con un tamaño que va de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm, tienen un grado de relleno de aproximadamente 0,80 para las tipo II.
- **AIF 2:** Inclusiones ovoides del tipo II con tamaños de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm y grado de relleno de 0,50.
- **AIF 3:** inclusiones irregulares del tipo III con un tamaño de entre  $7.5 \times 10^{-3}$  mm y 0,0125 mm y un grado de relleno de 0,10 y 0,20.
- **AIF 4:** inclusiones irregulares tipo V con tamaños de  $5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm.



**Figura 92.** Inclusiones tipos II, III, IV y V en cuarzo A. a), AIF 1; b) AIF 2; c) AIF 3; d) AIF 4; e) AIF 5 y f) AIF 6).



**Figura 93.** Inclusiones tipos I, II, IV en cuarzo B (imagen a y b) y C (imagen c a f).  
a) AIF 1; b) AIF 2; c) AIF 1; d) AIF 2; e) y f) AIF 3).

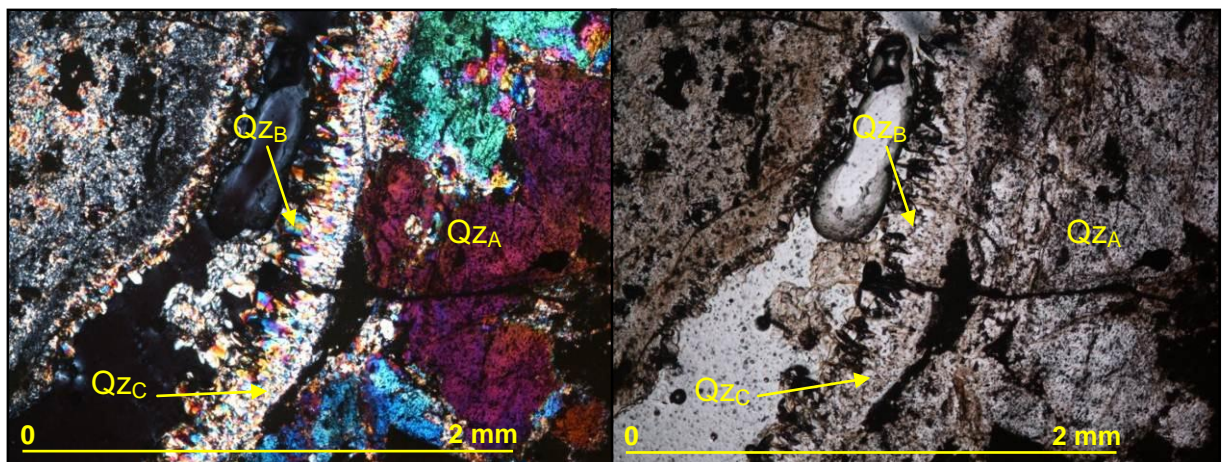
### TGJB-03-20

Muestra de vena de cuarzo color negro dentro de un granitoide alterado rico en cuarzo



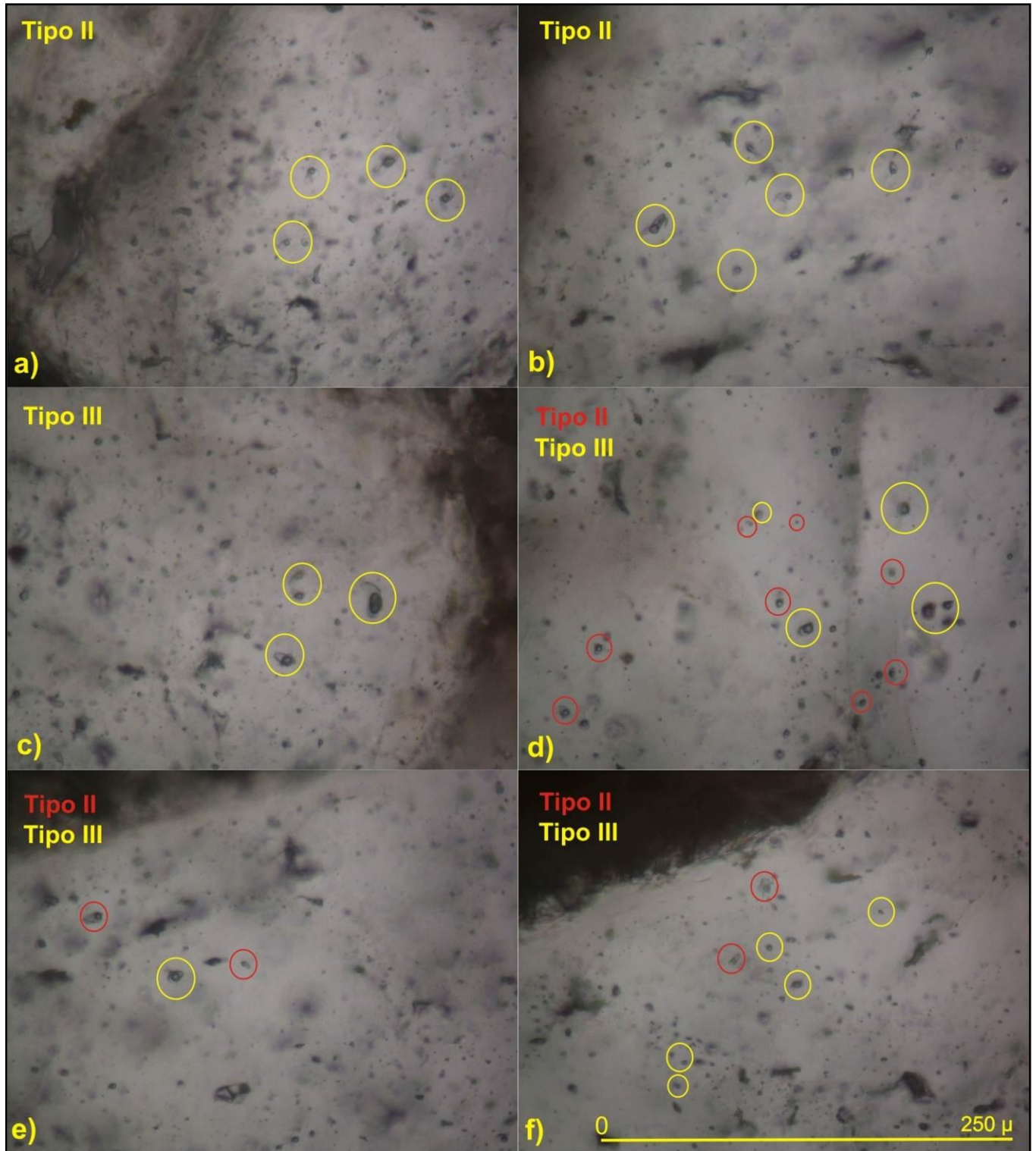
**Figura 94.** Lámina doblemente pulida. Inclusiones localizadas en el cuarzo oscuro.

Se observa en la una textura conocida como Comb donde los cuarzo se alinean de forma paralela y se encuentran perpendicular a las paredes de la vena, con un tamaño de grano uniforme. En esta muestra se observaron 3 tipos de cuarzo de los cuales solo el QzA contiene inclusiones fluidas.



**Figura 95.** Cuarzo A, B y C, solo el cuarzo A presenta inclusiones tipo I, II y III.

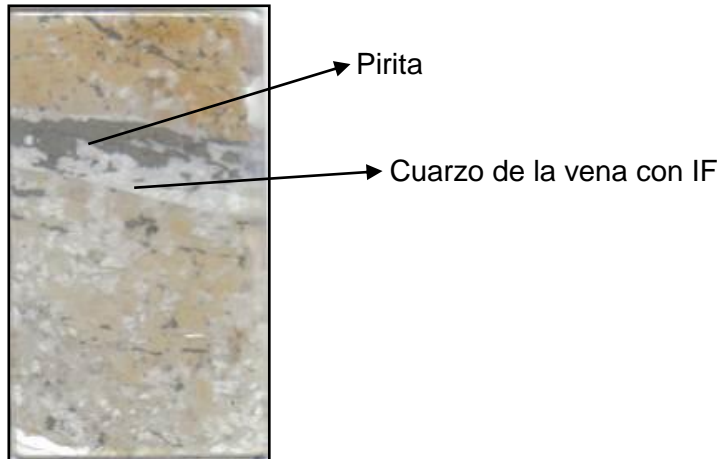
- **Cuarzo A:** cuarzos con formas irregulares y con tamaños de 0,2 mm a 1,5 mm
  - **AIF 1:** inclusiones irregulares y alargadas tipo II, con un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,015 mm, tienen un grado de relleno de 0,70 y 0,90
  - **AIF 2:** inclusiones irregulares de gran tamaño del tipo III y tipo II, tienen un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm, con un grado de relleno de 0,40 y 0,50.
  - **AIF 3:** inclusiones irregulares tipo I, poseen un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm.
  - **AIF 4:** inclusiones irregulares del tipo II y III con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm y un grado de relleno de 0,40 y 0,80 respectivamente.



**Figura 96.** Inclusiones tipo II y III en cuarzo A. a) y b) AIF 1; c) y d) AIF 2; e) y f) AFI 4.

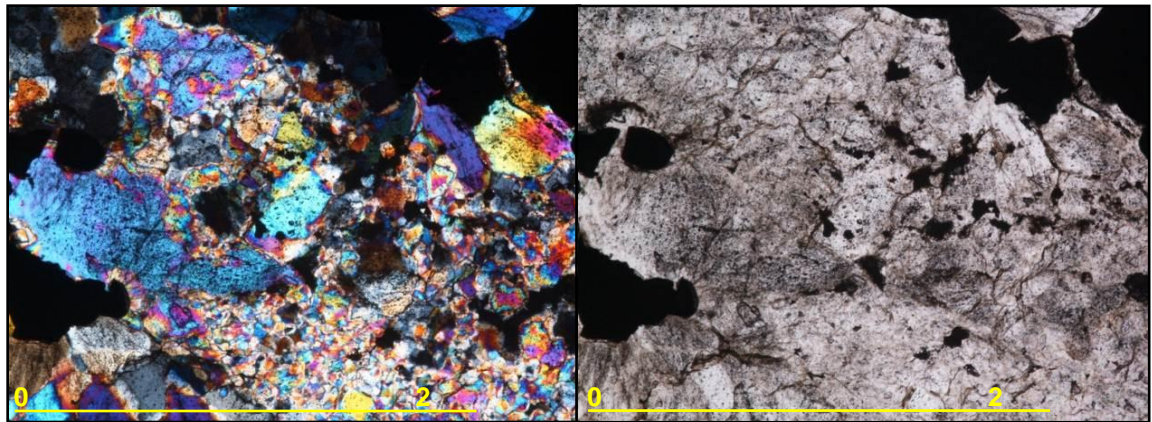
### TGJB-03-21

Muestra de venillas en roca granítica, con alto contenido de pirita en las venas de cuarzo



**Figura 97.** Lamina doblemente pulidas. Las inclusiones se encontraron en la vena de cuarzo + pirita.

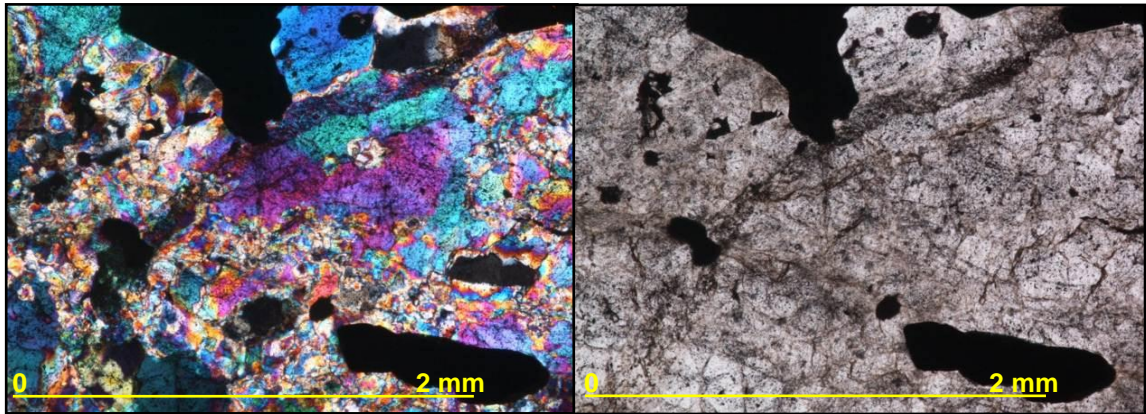
- **Cuarzo A:** pequeños cristales irregulares de cuarzo, con un aspecto sucio en nicols paralelos, distribuidos en toda la vena sin preferencia aparente con un tamaño de los cristales que va de 0,02 mm a 0,06 mm.



**Figura 98.** Cuarzo A hospedando inclusiones tipo I, II y IV. (nicols cruzados y nicols paralelos).

- **AIF 1:** pequeñas inclusiones irregulares y alargadas tipo II, con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,015 mm, tienen un grado de relleno de 0,80.
- **AIF 2:** inclusiones irregulares del tipo II + IV, tienen un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm, con un grado de relleno de 0,90 para las tipo II.
- **AIF 3:** inclusiones irregulares tipo I + II + IV, poseen un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a  $7.5 \times 10^{-3}$  mm y con grado de relleno que va de 0,80 a 0,90 para las tipo II.

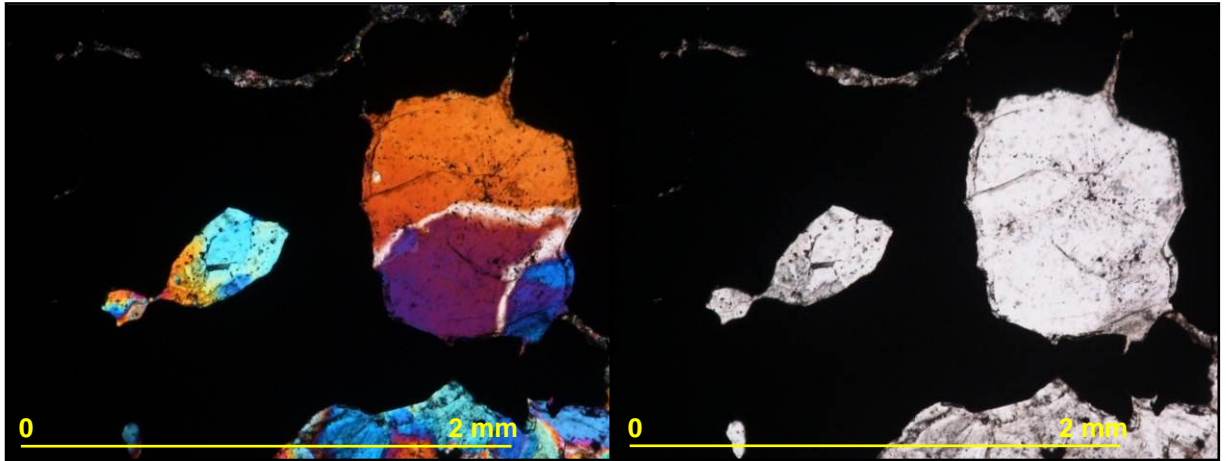
- **Cuarzo B:** cristales irregulares mucho más oscuros que los anteriores en paralelos y con un tamaño de 0,2 mm a 0,4 mm.



**Figura 99.** Cuarzo B hospedando inclusiones tipo II, III y IV. (nicoses cruzados y nicoses paralelos).

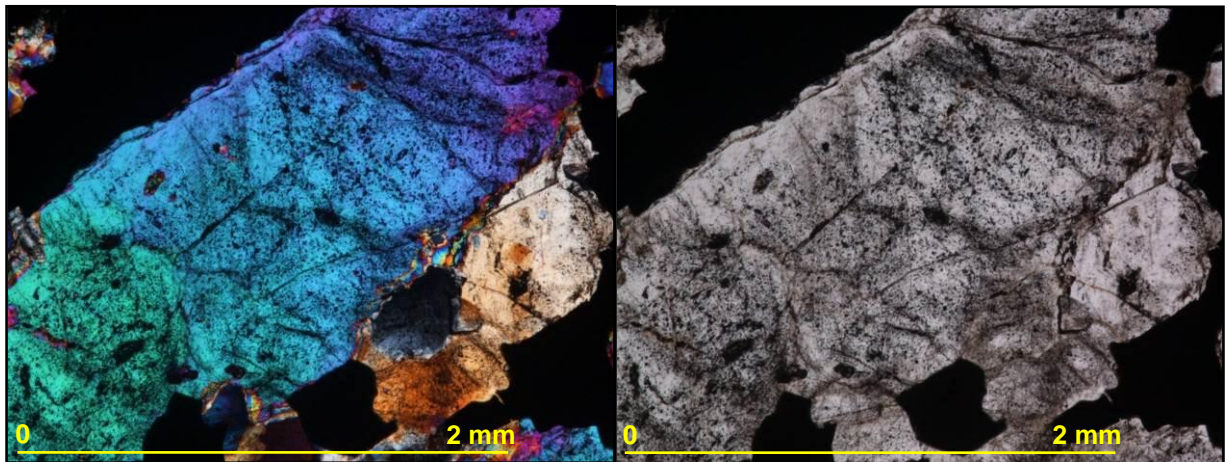
- **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo II, con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,02 mm y con un grado de relleno de 0,60 a 0,70.
- **AIF 2:** inclusiones irregulares y ovoides tipo II y IV con tamaños que van de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,01 mm, el grado de relleno para las tipo II es de 0,70.
- **AIF 3:** inclusiones irregulares tipo II + III con un tamaño de aproximadamente  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm, con grados de relleno que van de 0,90 y 0,20 respectivamente.

- **AIF 4:** inclusiones irregulares tipo III con un tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,015 mm y un grado de relleno de 0,20 a 0,10.
- **Cuarzo C:** cristales del mismo tamaño que el anterior pero con un aspecto mucho más limpio y formas más esféricas. Muestra inclusiones polifásicas con presencia de minerales hijo.



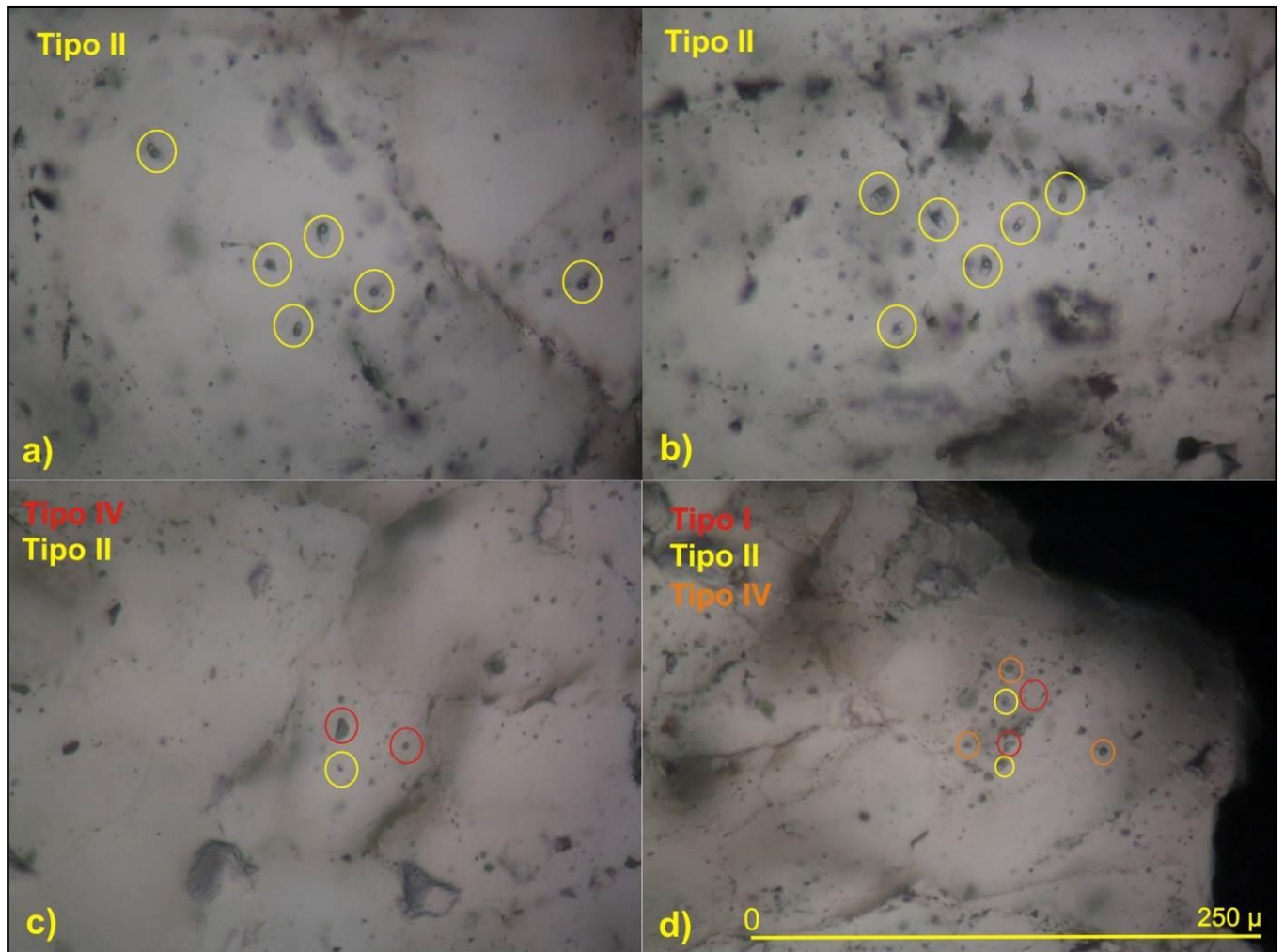
**Figura 100.** Cuarzo C hospedando inclusiones tipo II y V. (nicos cruzados y nicos paralelos).

- **AIF 1:** inclusiones irregulares del tipo V (L+V+S), con un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0.0125 mm.
- **AIF 2:** inclusiones irregulares del tipo II con tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,02 mm y un grado de relleno de 0,90.
- **Cuarzo D:** cuarzo de gran tamaño, de 1mm a 3 mm, de forma irregulares, igualmente se presentan con un aspecto sucio, posee inclusiones de gran tamaño y en grandes cantidades, además de inclusiones tipo V.

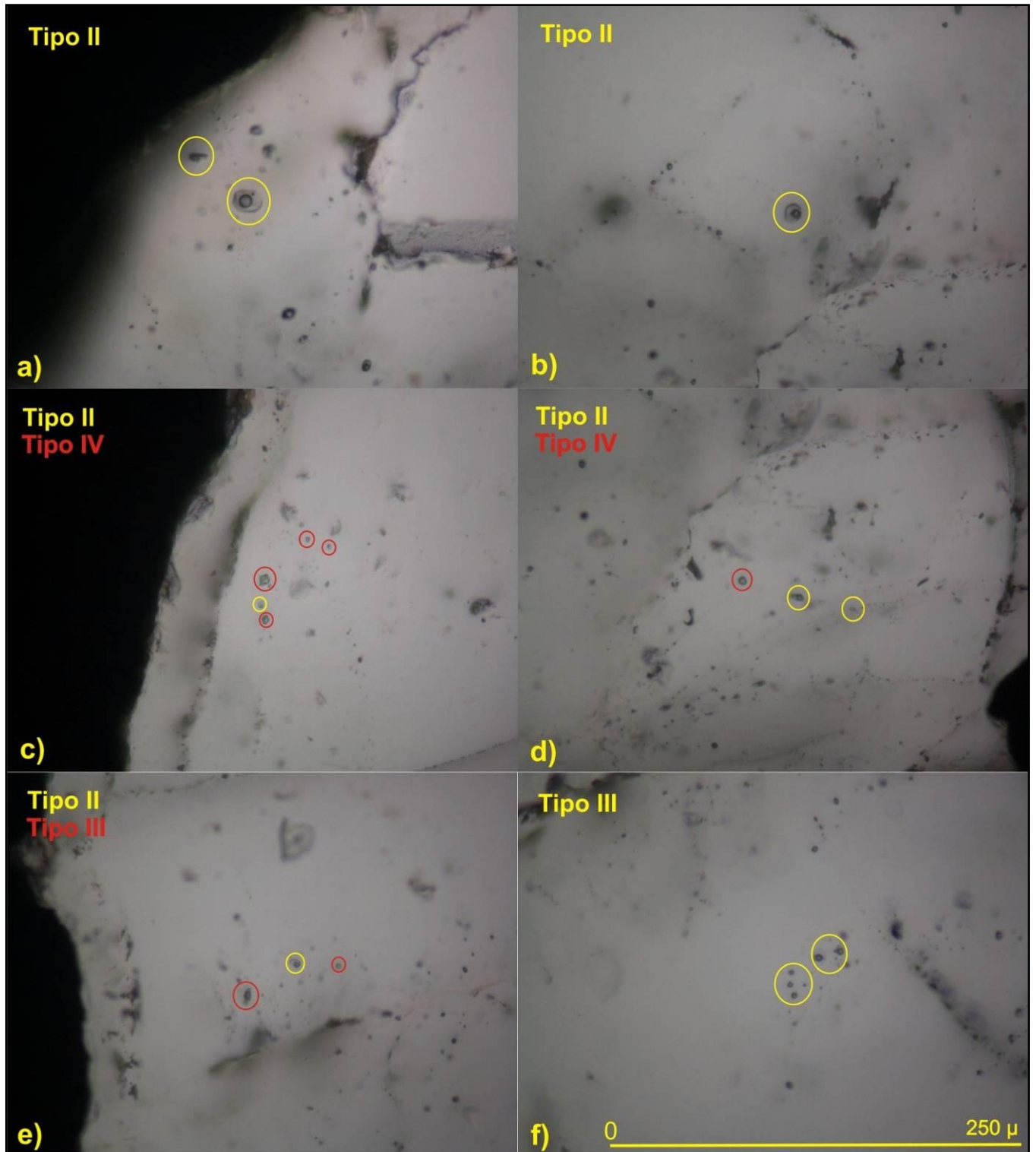


**Figura 101.** Cuarzo D con inclusiones tipo I, II, III y V. (nicoles cruzados y nicoles paralelos).

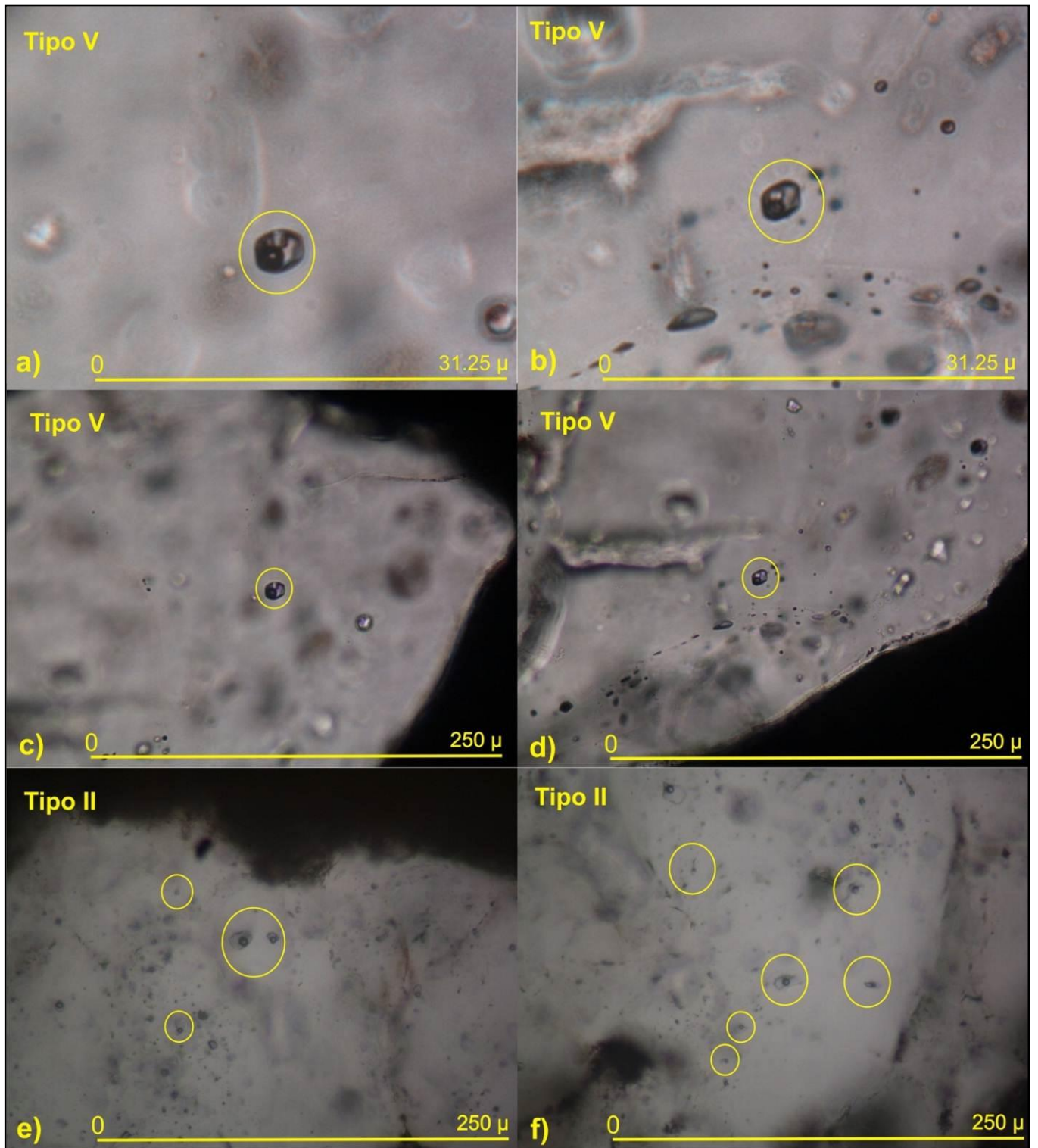
- **AIF 1:** inclusiones irregulares tipo V (L+V+S) + II (L+V) con un tamaño de aproximadamente de 0,0125 mm a 0,0275 mm.
- **AIF 2:** inclusiones irregulares tipo III con un tamaño de  $2.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm y un grado de relleno de 0,20 y 0,10.
- **AIF 3:** inclusiones irregulares, ovoides y alargadas del tipo II, con tamaño de  $5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm y grados de relleno que van de 0,60 a 0,70, se dan en gran cantidad en toda la extensión de este tipo de cuarzo.
- **AIF 4:** inclusiones irregulares del tipo II y I, tienen un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm y un grado de relleno de 0,90.
- **AIF 5:** inclusiones irregulares del tipo II y III con un tamaño de  $7.5 \times 10^{-3}$  mm a 0,0125 mm con un grado de relleno de 0,90 y 0,20 respectivamente.



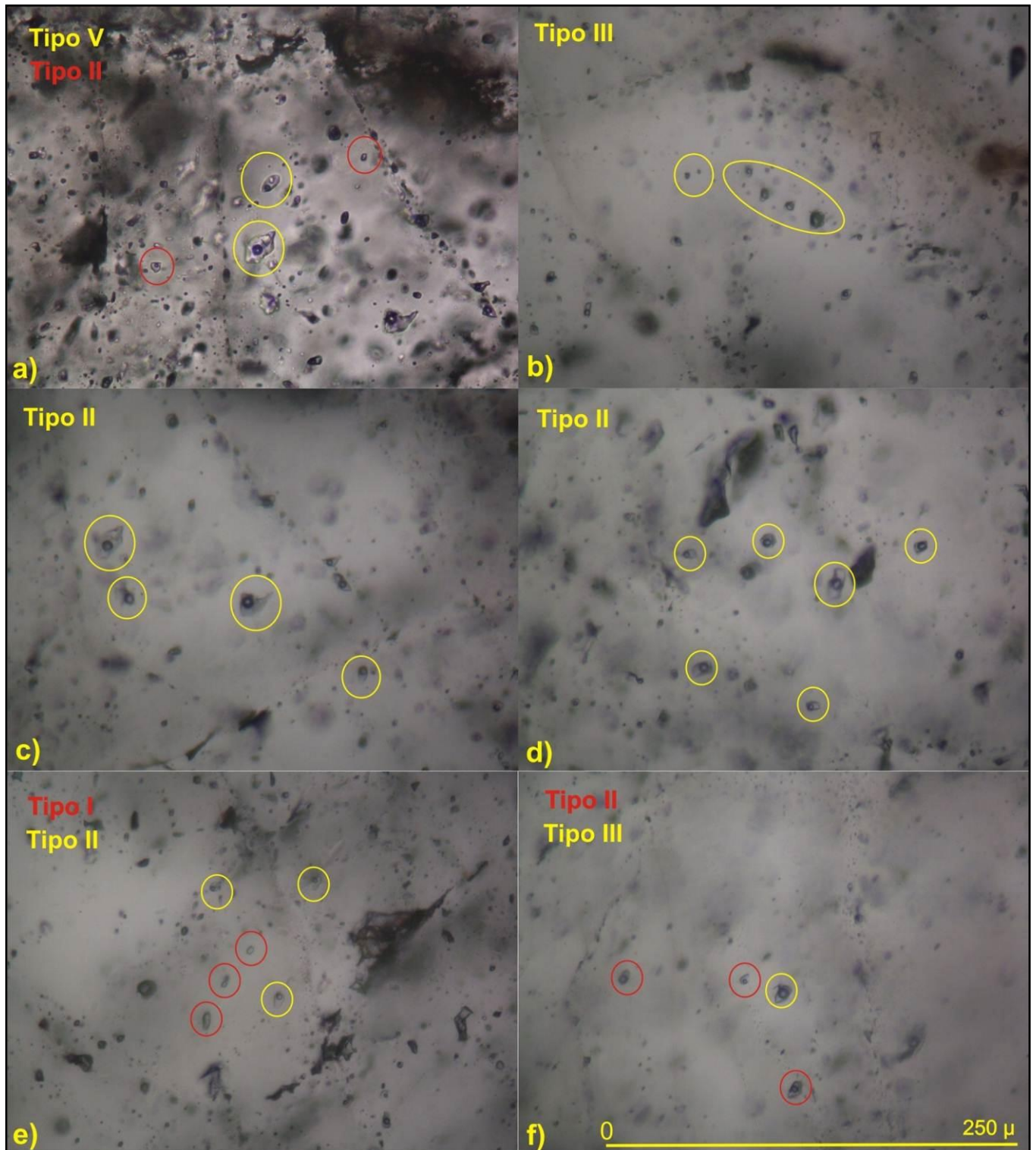
**Figura 102.** Inclusiones tipos I, II y III en cuarzo A. a) y b) AIF 1; c) AIF 2; d) AIF 3.



**Figura 103.** Inclusiones tipos II, III, IV y V en cuarzo B. a) y b) AIF 1; c) y d) AIF 2; e) AIF 3; f) AIF 4.



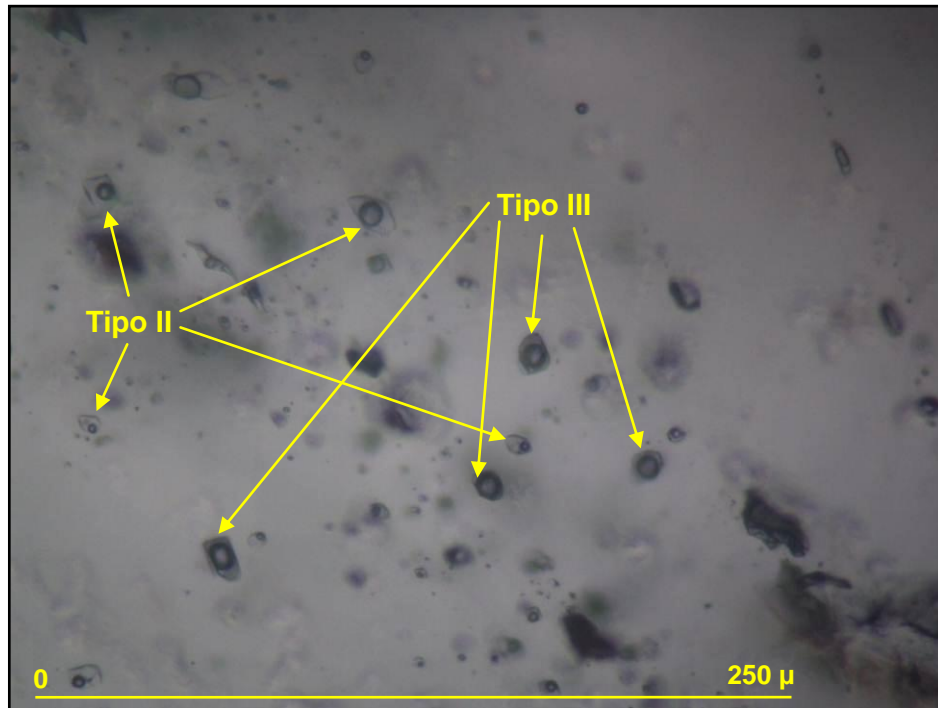
**Figura 104.** Inclusiones tipos II y IV en cuarzo C. a), b), c) y d) AIF 1; e) y f) AIF 2.



**Figura 105.** Inclusiones tipos I, II, III y V en cuarzo D. a) AIF 1; b) AIF 2; c y d) AIF 3; e) AIF 4; f) AIF 5.

#### 4.6.1.1. Significado geológico de las asociaciones de inclusiones fluidas.

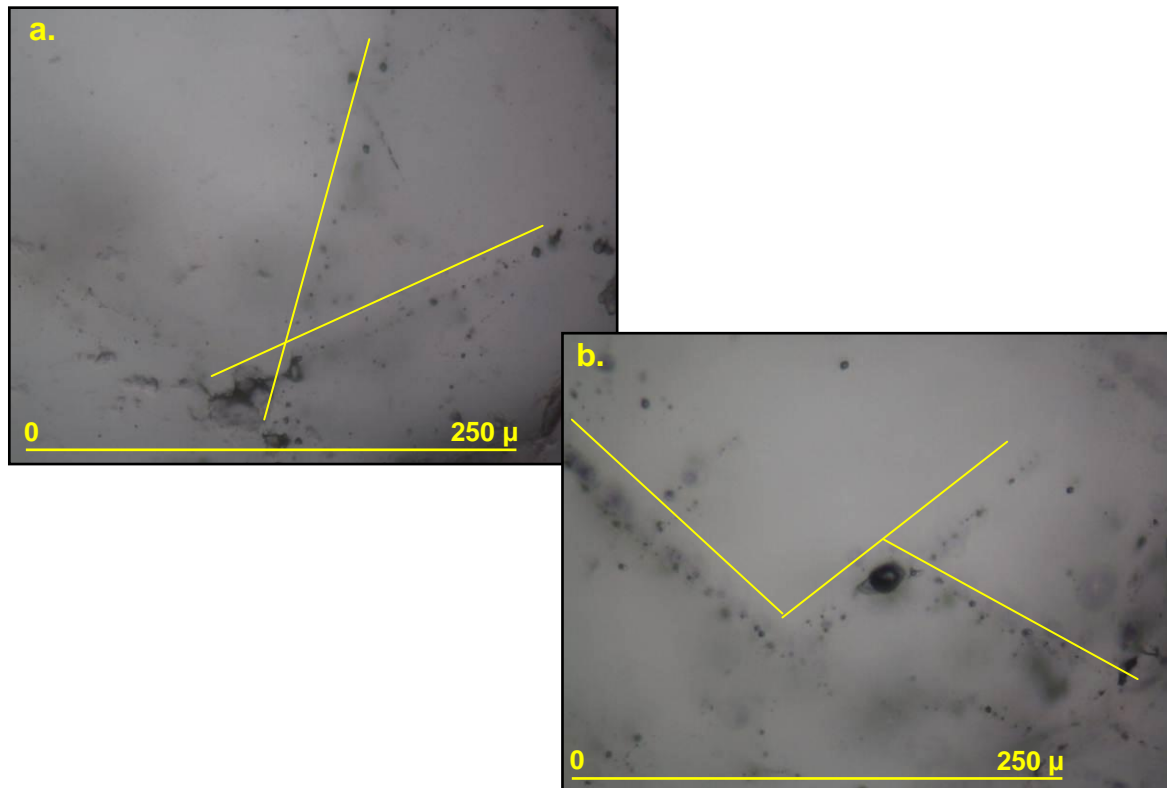
La presencia de inclusiones ricas en líquido o tipo II y ricas en vapor o tipo III hizo pensar en un principio en la posibilidad de que las inclusiones hayan sido atrapadas en un ambiente de ebullición, ya que esta asociación es evidencia de un proceso de inmiscibilidad de fluidos. Luego de realizar la microtermometría a varias de estas inclusiones y conocer que la Temperaturas de homogenización son relativamente bajas se dudó mucho en cuanto al estado del fluido al momento del atrapamiento, dejando la posibilidad de existir un proceso de condensación de fluidos, mas no de ebullición.



**Figura 106.** Muestra TGJB-03-19, asociación de inclusiones tipo II y III.

Fueron también observadas inclusiones de origen secundario bien alineadas atravesando los cristales, lo cual muestra que ocurrieron eventos de fracturamiento de dichos cristales posterior a su formación, creando así fisuras

por donde posteriormente los fluidos se infiltraron (figura 107). Estas inclusiones secundarias no fueron medidas ya que los valores representarían temperaturas de fluidos posteriores a la formación de los cristales.



**Figura 107.** Inclusiones secundarias. a) muestra TGJB-03-17. b) muestra TGJB-03-21.

En 3 de las 8 muestras analizadas existe la presencia de cristales de halita también llamados cristales hijo (considerados de halita por la forma cuadrada típica de este mineral), lo cual hace pensar preliminarmente, que los fluidos mineralizantes, o al menos uno de ellos, contenían una salinidad alta, esto partiendo del hecho de que los cristales (minerales hijo) son producto de la precipitación de soluciones con salinidades altas, mayores de 26,3 wt% NaCl (Velazco, 2004).



**Figura 108.** Inclusiones tipo V en cuarzo A. Son raras este tipo de inclusiones ya que a pesar de ser tipo V, presentan dos cristales de halita.

Podría pensarse en la posibilidad de que algunos de estos sólidos hayan sido arrastrados y atrapados (minerales cautivos) por la solución, esto debido a la poca probabilidad de que una cantidad de líquido tan pequeña, como la que se muestra en la figura 110, pueda precipitar dos cristales de halita de un tamaño tan considerable (Velazco, 2004), pero esto quedó descartado al ver las temperaturas a las cuales fundieron dichos sólidos de halita.

#### 4.6.2. Resultados Microtermométricos

Los datos microtermométricos se realizaron mediante la medición de las temperaturas eutéctica:  $T_e$ , temperatura de fusión:  $T_m$  y temperatura de

homogenización: Th de cada una de las muestras, así como la temperatura de fusión de la halita: Tms para las inclusiones tipo V. Para cada lámina fueron analizadas mínimo 2 inclusiones y máximo 5, para algunas de estas inclusiones solo se les fue tomada la Th. De las 8 muestras analizadas 7 pertenecen al pórfido y una (TGJB-01-07) pertenece al núcleo silíceo.

#### 4.6.2.1. Composición de los fluidos (sistema cristalino, salinidad y densidad).

Mediante la temperatura eutéctica de cada una de las inclusiones, que corresponde a la temperatura a la cual comienza el hielo a fundir, fue posible hallar la composición (sistema químico) del fluido o fluidos mineralizantes. Para cada sistema salino han sido halladas sus respectivas temperaturas eutécticas como lo muestra la tabla 39.

Sistema salino	Temperatura eutéctica	Sistema salino	Temperatura eutéctica
H <sub>2</sub>	-259,15	NaCl-MgCl <sub>2</sub>	-35
O <sub>2</sub>	-218,79	NaCl-KCl	-23,5
N <sub>2</sub>	-210		-22,9
CO	-205	NaCl-NaSO <sub>4</sub>	-21,7
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-188	NaCl-NaHCO <sub>3</sub>	-21,8
Ar	-185,37	NaCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-21,4
CH <sub>4</sub>	-182,5	NaCl	-21,2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-182		-21,8
H <sub>2</sub> S	-85,5	H <sub>2</sub> O-KCl	-10,6
NH <sub>3</sub>	-77,66	NaHCO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-3,3
SO <sub>2</sub>	-75,51	NaHCO <sub>3</sub>	-2,3
CO <sub>2</sub>	-56,57	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-2,1
H <sub>2</sub> O	0,01	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1,2
NaCl-CaCl <sub>2</sub>	-55		
MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub>	-52,2		
KCl-CaCl <sub>2</sub>	-50,5		
CaCl <sub>2</sub>	-49,8		
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-37		

H <sub>2</sub> O-NaCl-FeCl <sub>2</sub>	-37		
H <sub>2</sub> O-FeCl <sub>2</sub>	-35		

**Tabla 39.** Temperaturas del punto eutéctico para diferentes sistemas salinos acuosos (a 1 atm). (Tomado y editado de Pitzer, 1995; Poling et al, 2001; Lemmon et al; 2001 y Velasco, 2004).

Con la anterior tabla fue posible encontrar las diferentes composiciones de los líquidos (tabla 40). Posteriormente y con ayuda de la temperatura de fusión, la cual representa el valor de la temperatura a la cual ha fundido la totalidad del hielo, y mediante la **ecuación 3** propuesta por Potter et al., (1978) es calculado el porcentaje de salinidad de cada inclusión.

**Ecuación 3:**

$$\% \text{ NaCl} = 1.76958 \cdot T_m + 4.2384 \times 10^{-2} \cdot T_m^2 + 5.2778 \times 10^{-4} \cdot T_m^3 (\pm 0.028)$$

Donde **T<sub>m</sub>**=Temperatura de fusión del hielo.

Cuando hay presencia de minerales hijos en las inclusiones es necesario utilizar una ecuación diferente a la anterior; para esta nueva ecuación se debe conocer la temperatura de fusión, no del hielo, sino del mineral hijo dentro de la inclusión, es decir, la temperatura a la cual se disuelve dicha sal, que en este caso es la halita.

**Ecuación 4:**

$$\% \text{ NaCl} = 26,218 + 0,0072 T_{ms} + 0,000106 (T_{ms})^2 \pm 0,05$$

Donde **T<sub>ms</sub>**=Temperatura de disolución del cristal de sal.

El cálculo de la densidad se hizo mediante el programa BULK, versión 08/02 desarrollado por Ronald J. Bakker

Muestra	Tipo de Inclusión	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	T. Eutéctica-Te (°C)	Composición H <sub>2</sub> O +	T. de fusión del hielo - Tm (°C)	T. de fusión de la sal - Tms (°C)	Salinidad (% wt NaCl)
TGJB-01-06	Tipo II	0.833338	-35,4	NaCl-MgCl <sub>2</sub> y FeCl <sub>2</sub> ?	-1,5	----	~2,56
	Tipo II	0.942046	-57,2	CO <sub>2</sub> ?	-18,5	----	~18,4
	Tipo II	0.839648	-47,1	CaCl <sub>2</sub>	-1,3	----	~2,3
TGJB-01-07	Tipo II	0.727830	-29,6	NaCl-MgCl <sub>2</sub>	-2,5	----	~4,15
	Tipo II	---	-31,8	NaCl-MgCl <sub>2</sub>	<u>4,5</u>	----	<u>~8,82</u>
	Tipo II	----	-52,5	MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub>	<u>1,1</u>	----	<u>~1,99</u>
	Tipo III	0.254470	-50,3	KCl-CaCl <sub>2</sub>	-4,5	----	~7,10
TGJB-02-12	Tipo II	0.693170	-24,8	NaCl-KCl	-5,1	----	~7,92
	Tipo II	0.897874	-21,5	NaCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-8,5	----	~12
	Tipo III	0.566440	-37,7	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> o NaCl-FeCl <sub>2</sub>	-8,2	----	~11,66
	Tipo V	1.029406	-61,8	NaCl-NaHCO <sub>3</sub> ?	----	195,9	<b>~31,69</b>
TGJB-02-14	Tipo II	0.865044	-55,4	NaCl-CaCl <sub>2</sub>	-4,8	----	~7,51
	Tipo II	0.756415	-51,4	KCl-CaCl <sub>2</sub>	-7,8	----	~11,31
	Tipo II	0.668989	-24,3	NaCl-KCl	-2,1	----	~3,53
TGJB-03-17	Tipo II	----	-51,2	MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub> ?	<u>8,1</u>	----	<u>~17,12</u>
	Tipo II	----	-54,3	NaCl-CaCl <sub>2</sub>	----	----	----
	Tipo II	0.878305	-24,6	NaCl-KCl	-4,5	----	~7,10
	Tipo II	----	-19,5	NaCl ?	<u>3,6</u>	----	<u>~6,92</u>
TGJB-03-19	Tipo II	----	-30,4	¿???	<u>4,5</u>	----	<u>~8,82</u>
	Tipo II	0.676549	-36,2	FeCl <sub>2</sub> o NaCl-MgCl <sub>2</sub> ?	-6,1	----	~9,22
	Tipo II	----	-10,6	KCl	----	----	----
	Tipo V	0.919648	-57,7	CO <sub>2</sub>	----	334,4	<b>~40,47</b>
	Tipo V	1.063096	-57,2	CO <sub>2</sub>	----	258,3	<b>~35,14</b>
TGJB-03-20	Tipo II	0.681345	-56,1	CO <sub>2</sub>	-7,1	----	~10,43
	Tipo II	0.678199	-44,7	CaCl <sub>2</sub>	-3,3	----	~5,37
TGJB-03-21	Tipo II	0.846203	-55,5	CO <sub>2</sub> ?	-3,6	----	~5,82
	Tipo II	0.908314	-41,1	CaCl <sub>2</sub>	-4,5	----	~7,10
	Tipo II	0.586679	-60,7	CO <sub>2</sub> ?	-0,2	----	~0,40
	Tipo V	1.120220	-56,2	CO <sub>2</sub>	-----	210,1	<b>~32,40</b>
	Tipo V	1.109195	-61,5	CO <sub>2</sub> ?	-----	200,2	<b>~31,90</b>

**Tabla 40.** Composición y salinidad de las IF. Los valores en rojo corresponden a las salinidades de inclusiones con presencia de sólidos, los valores subrayados corresponden a temperaturas de fusión de hielo por encima de 0°C.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la composición de los fluidos está dominada por los iones  $H_2O + Na + MgCl_2 + K + CO_2 + Ca_2 + Na_2CO_3$  ?.

Era de esperarse que la inclusiones con sólidos de halita en su interior dieran salinidades más altas, como se observa en la tabla 40 los valores en rojo muestran que estas salinidades se encuentran entre 30 y 40 % wt NaCl, significativamente más altas que las demás salinidades.

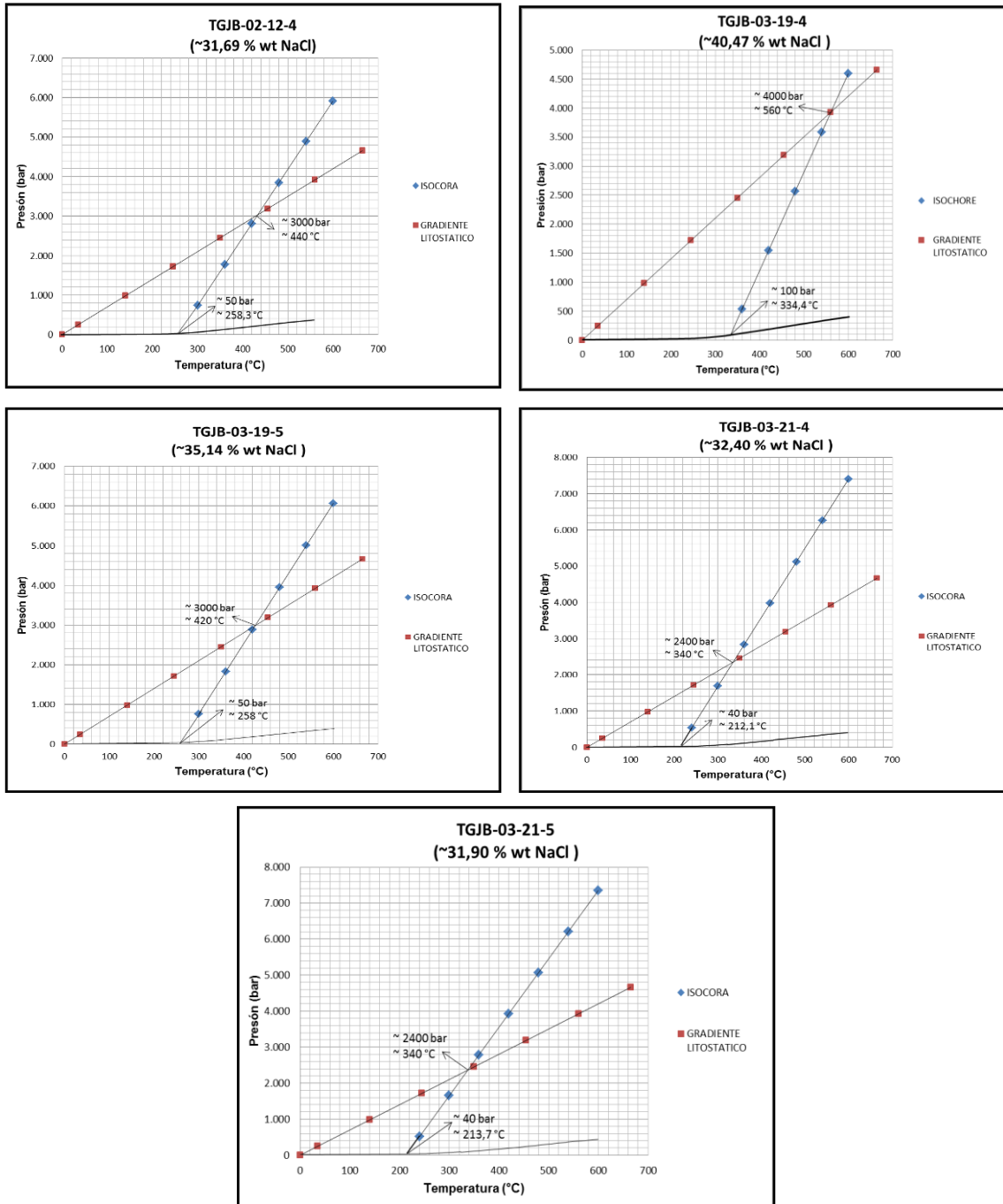
#### **4.6.2.2. Temperatura y presión de homogenización.**

La temperatura de homogenización representa la mínima temperatura a la cual fue atrapada la inclusión, y para llegar a esto, es necesario calentar las inclusiones hasta que las fases presentes se homogenicen, es decir, que se conviertan a líquido o vapor según sea el caso. Clifton Sorby (1826-1904) un estudioso de las inclusiones propuso lo que hasta hoy se considera uno de los principios fundamentales para el estudio de inclusiones fluidas. Él notó que la burbuja que se encuentra en la mayoría de inclusiones es producto de una contracción o encogimiento del líquido respecto al mineral encajante, ya que el coeficiente de contracción del líquido es dos veces mayor que el de los minerales (Velasco, 2004). Esta contracción es producto del enfriamiento que sufre la inclusión desde la temperatura de formación hasta la temperatura ambiente, y es ahí donde la burbuja de gas se forma. Si estas inclusiones son calentadas hasta dicha temperatura ( $T_h$ ) podremos conocer la temperatura de atrapamiento mínima. Teniendo presente lo anterior, se procedió al calentamiento de cada una de las inclusiones hasta su respectiva temperatura de homogenización.

Se debe tener presente que hay cierta diferencia entre la temperatura de homogenización ( $T_h$ ) y la temperatura de atrape ( $T_a$ ), la primera es la temperatura mínima de atrapamiento, pero la segunda es la verdadera temperatura del fluido cuando este fue atrapado por el mineral, la cual va a ser mayor. Esta diferencia se debe a que la presión del entorno de la inclusión (durante el enterramiento) es mayor que la presión de vapor dentro de la inclusión (Mangas J. y Sierra J., 2004), lo cual crea una variación en la temperatura, que como se sabe, esta depende de la presión; si sucediera lo contrario, es decir, si la presión de la inclusión fuera mayor, estaríamos en un caso de ebullición, lo cual se vería reflejado en la inclusión y por lo tanto la  $T_h$  sería la misma  $T_a$ .

La presión de homogenización puede considerarse como la mínima presión reinante durante el atrapamiento de la inclusión, aunque hay que tener presente que la presión de captura es siempre mayor ya que se debe considerar tanto la presión litostática como la hidrostática que existía en el momento de la captura de la inclusión, pero de todas formas, el factor más influyente en la presión, viene siendo la cantidad de sales disueltas (Manga J. y Sierra J., 2004). Es posible igualmente calcular una temperatura mínima de atrape de las inclusiones fluidas mediante los diagramas de presión vs temperatura donde se ilustra la disposición de las isocoras. Estas isocoras o líneas en el campo P-T representan iguales condiciones de densidad para cada inclusión, por lo que es necesario hacer el cálculo para cada inclusión con densidad diferente. Para crear las isocoras fue utilizado el programa ISOC, versión 08/02 desarrollado por Ronald J. Bakker

La figura 109 muestra que la máxima presión de atrape estará dada por la intersección de la isocora y la línea de gradiente litostática, esta isocora comienza en la punto cuya temperatura hace referencia al momento de homogenización de la muestra. Con lo anterior se tiene unos rangos de presiones promedio para las muestras de entre 40, 50 y 100 bares, con unas presiones máximas de 2400, 3000 y 4000 bares.



**Figura 109.** Diagramas de isocoras para las inclusiones tipo V representadas por el sistema H<sub>2</sub>O+NaCl. El último número en la nomenclatura de la muestra representa el número de la inclusión.

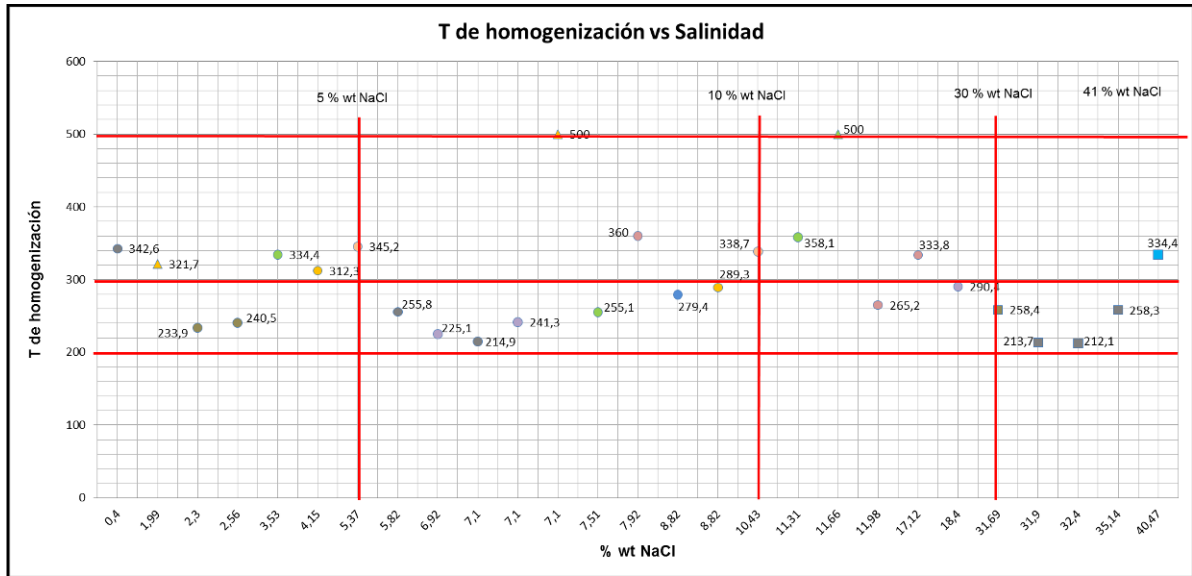
Muestra	Tipo de Inclusión	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Fase a la que homogeniza	Salinidad (% wt NaCl)	Temperatura de homogenización - Th (°C)	Presión (bar)
TGJB-01-06	Tipo II	0.833338	V	~2,56	240,5	----
	Tipo II	0.942046	L	~18,4	290,4	----
	Tipo II	0.839648	L	~2,3	233,9	----
	Tipo III	----	L	----	370,4	----
	Tipo III	----	V	----	388,3	----
TGJB-01-07	Tipo II	0.727830	L	~4,15	312,3	----
	Tipo III	----	¿	----	> 400	----
	Tipo II	----	L	~8,82	289,3	----
	Tipo III	----	L	~1,99	321,7	----
	Tipo III	0.254470	¿	~7,10	> 500	----
	Tipo III	----	L?	----	387,1	----
TGJB-02-12	Tipo II	0.693170	L	~7,92	360	----
	Tipo II	0.897874	L	~11,98	265,2	----
	Tipo III	0.566440	¿	~11,66	> 400	----
	Tipo V	1.029406	L	<b>~31,69</b>	258,4	<b>~ 50</b>
TGJB-02-14	Tipo II	0.865044	L	~7,51	255,1	----
	Tipo II	0.756415	L	~11,31	358,1	----
	Tipo II	0.668989	L	~3,53	334,4	----
TGJB-03-17	Tipo II	----	L	<u>~17,12</u>	333,8	----
	Tipo II	----	L	----	235,7	----
	Tipo II	0.878305	L	~7,10	241,3	----
	Tipo II	----	L	<u>~6,92</u>	225,1	----
	Tipo III	----	V	----	360,1	----
TGJB-03-17	Tipo II	----	L	----	304,5	----
	Tipo II	----	L	----	210,9	----
	Tipo II	----	L	----	348,1	----

	Tipo III	----	L	----	382,9	----
	Tipo III	----	L	----	396,9	----
TGJB-03-19	Tipo II	----	L	<u>~8,82</u>	279,4	----
	Tipo II	0.676549	L	~9,22	A 379,4 decriptó	----
	Tipo II	----	L	----	242,6	----
	Tipo V	0.919648	L	<b>~40,47</b>	334,4	<b>~ 100</b>
	Tipo V	1.063096	L	<b>~35,14</b>	258,3	<b>~ 50</b>
	Tipo III	----	L	----	362,9	----
	Tipo III	----	V	----	399,3	----
TGJB-03-20	Tipo II	0.681345	L	~10,43	338,7	----
	Tipo II	0.678199	L	~5,37	345,2	----
TGJB-03-21	Tipo II	0.846203	L	~5,82	255,8	----
	Tipo II	0.908314	L	~7,10	214,9	----
	Tipo II	0.586679	L	~0,40	342,6	----
	Tipo V	1.120220	L	<b>~32,40</b>	212,1	<b>~ 40</b>
	Tipo V	1.109195	L	<b>~31,90</b>	213,7	<b>~ 40</b>
	Tipo III	----	V	----	355,8	----
	Tipo III	----	L	----	375,8	----

**Tabla 41.** Temperaturas y presiones mínimas de homogenización.

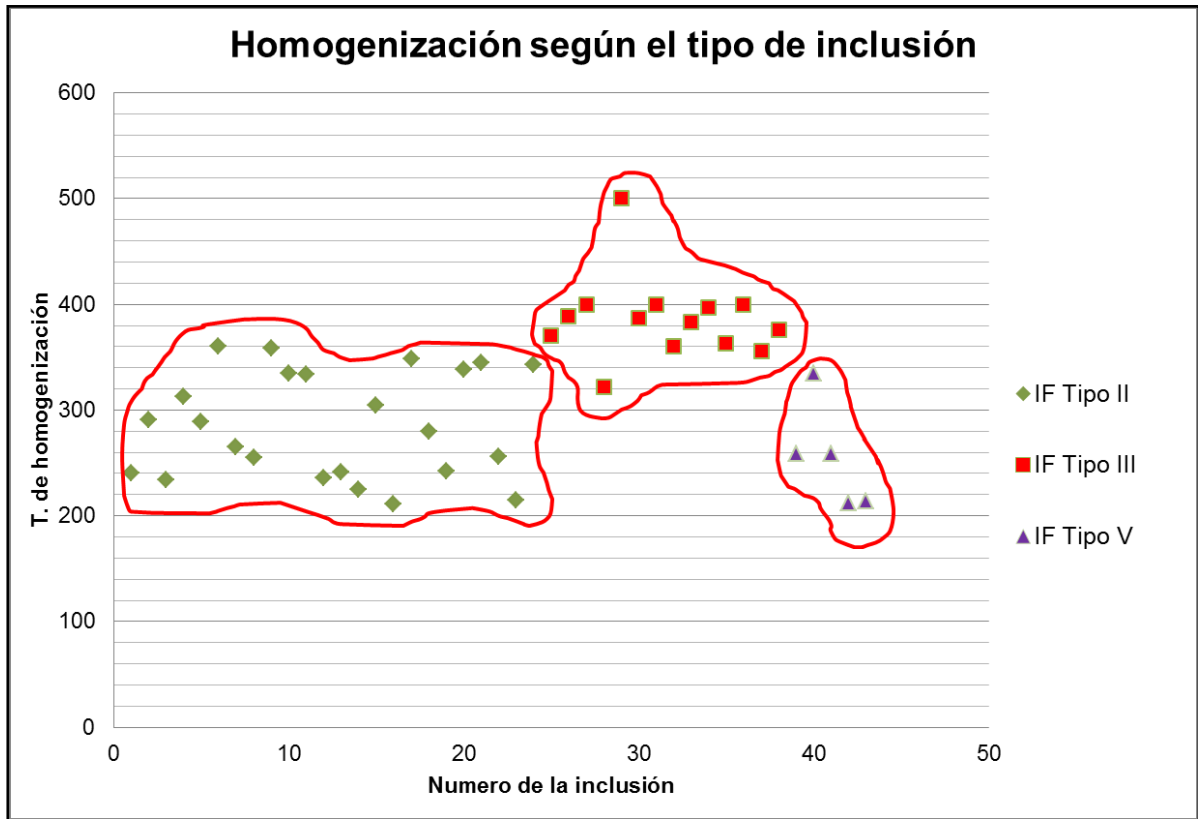
Al observar las temperaturas de homogenización y de fusión de los sólidos de halita de las inclusiones tipo V, es notorio que estas temperaturas sean relativamente bajas. Si bien las temperaturas son muy variantes en todas las muestra, se puede ver que las  $T_h$  registradas en el núcleo silíceo van entre 289 y mayores a 500° C, las cuales son temperaturas considerablemente más altas a las registradas en las muestras del plutón, sin tener en cuenta el tipo de inclusión.

Como lo muestra la figura 110, es evidente la presencia de dos diferentes eventos hidrotermales. Uno de ellos es posible establecerlo en un rango de aproximadamente 200 a 300 grados y el otro que va de 300 a 400 grados



**Figura 110.** Triángulos: inclusiones tipo III, círculos: inclusiones tipo II, cuadrados: inclusiones tipo V.

Los valores de las temperaturas de homogenización dejan ver un cierto patrón en cuanto al tipo de inclusión. La figura 111 muestra que las inclusiones ricas en líquido (tipo II) que son las más abundantes, presentan una  $T_h$  de entre 233° C y 360° C, las tipo III o ricas en vapor homogenizaron entre 321° C y 400° C, llegando muchas veces a sobrepasar los 450° C y presentándose un solo caso donde la inclusión llegó a 500° C sin notarse un cambio en las fases presentes. Las inclusiones con cristales hijos de halita o tipo V se encuentran en un rango de temperatura relativamente bajo, de las 5 inclusiones que se midieron de este tipo, 4 homogenizaron entre los 200° C y los 250° C y solo una llegó a los 334,4° C.



**Figura 111.** Rangos de homogenización de los tres diferentes tipos de inclusiones medidas en el laboratorio.

## 5. DISCUSIÓN

La petrografía permitió identificar tres principales tipos de alteración, alteración sericitica, cuarzo-alunita y silicificación, siendo la primera predominante en el cuerpo ígneo y la segunda localizada en el núcleo silíceo, pero con evidencia igualmente en algunas pocas muestras del plutón. De lo anterior se destacan dos eventos diferentes, siendo el núcleo de cuarzo un evento posterior al que provocó la alteración del plutón. Dichas alteraciones son las típicas de un sistema de alta sulfuración las cuales se esperarían encontrar en el área de California.

Teniendo presente el grado de alteración de las rocas ígneas del área de estudio, es de resaltar que las clasificaciones químicas, elementos MMT, deben considerarse como una descripción de la litología neoformada, y no como un reflejo del cuerpo plutónico original. Partiendo de la geología registrada en la zona, resulta conveniente asumir estas rocas como los cuerpos cuarzomonzonitos hallados en el área de California.

Valiéndonos de los resultados petrográficos y termométricos de las inclusiones fluidas analizadas tanto en el cuerpo plutónico, como en el núcleo silíceo es evidente que los fluidos que interactuaron con la roca son de baja temperatura (250-350°C), tratándose de fluidos dentro de un cuerpo ígneo. Encontrar las asociaciones de inclusiones tipo II y tipo III sugeriría un ambiente de atrapamiento de ebullición, pero como lo muestran las bajas temperaturas de homogenización, así como la no coincidencia de estas temperaturas de homogenización tanto para las inclusiones ricas en líquido y ricas en vapor, es conveniente no tomar este fenómeno como de ebullición.

Tratando de explicar la relación fluido-roca para proponer un modelo, pero sin asumir éste como única explicación a la situación geológica encontrada en la zona, se pueden atribuir las inclusiones ricas en vapor y con temperaturas de homogenización mayores a 450°C a fluidos dentro del propio cuerpo plutónico,

que pudieron interactuar con fluidos (menos caliente) representadas por inclusiones ricas en líquido y con Th más bajas. Lo anterior no supone un proveniencia de los paleofluidos del propio plutón, puesto que pueden ser fluidos que ascendieron de más abajo. La solución a esto se deja como una incógnita que surge en el desarrollo del presente trabajo.

La presencia del núcleo silíceo, sugiere un evento diferente al que alteró el cuerpo ígneo, la discusión se centra en por que esta alteración es cuarzo-alunita y por qué se da como un cuerpo diferente dentro de plutón. Lo anterior se podría interpretar, si se asume éste cuerpo con alteración cuarzo-alunita, como un cuerpo de composición diferente intruyendo al propio plutón (dique). Evidencia de esto podría verse en los fenocristales de alunita en los extremos del núcleo, los cuales habrían alterado los cristales de plagioclasas registrados en rocas de composición cuarzodiorita.

## 6. CONCLUSIONES

1. En el sector objeto de estudio, se evidencia la presencia de una falla geológica en dirección aproximada NE (Falla Pie de Gallo), la cual parece ser satélite de la Falla NE que sigue el lineamiento de la Quebrada la Baja.
2. Tanto al norte (bloque A), como al sur (bloque B) de la Falla de Pie de Gallo, se observan algunas variedades de rocas ígneas félsicas, de grano fino a medio, holocristalinas, clasificadas en éste trabajo como monzogranitos y sienogranitos, las cuales presentan una alteración hidrotermal, fundamentalmente tipo sericítica.
3. En el bloque B (estaciones 1 y 3) de la falla Pie de Gallo, cortando las rocas félsicas con alteración sericítica, se presenta un núcleo silíceo de unos 15-20m de espesor, en el cual se reconocieron relícticos de un material porfirítico (fenocristales en torno a 1 cm de longitud), con una importante alteración argílica avanzada (cuarzo-alunita).
4. Los relictos porfiríticos en el núcleo silíceo (silicificados y con alunita), parecen corresponder a antiguos diques de composición andesito-dacítica observados en diferentes sectores del distrito minero de Vetas y California, generalmente cortando las rocas de edad Jurásico.
5. Entorno al núcleo silíceo anteriormente descrito, se reconoce una alteración cuarzo-alunita, la cual afecta las rocas félsicas.
6. Las temperaturas eutécticas de la inclusiones registradas mediante la termometría mostró que los fluidos son predominantemente de composición  $H_2O + NaCl + MgCl_2 + KCl + CO_2 + CaCl_2 + Na_2CO_3$  ?. Mediante las temperaturas del fusión del hielo y de los sólidos de halita se logró

identificar salinidades de entre 1 y 17 % wt de NaCl registradas tanto para las inclusiones tipo II y III, y para las tipo V se registraron valores de entre 30 y 40 % wt de NaCl. Las isocoras para las IF tipo V permitió conocer los valores de presión mínima de 40, 50 y 100 bares.

7. El estudio de inclusiones fluidas, muestran AIF con temperaturas típicas de ambientes frágiles (<370°C), pero de igual manera se han reconocido IF con temperaturas >370°C (llegando a sobrepasar los 500°C, sin alcanzar la homogenización total), lo cual implica condiciones en ambiente dúctil de la corteza, tal como se plantea en (Fournier, 1999).
8. La presencia de IF con una relación L/V bajas (IF ricas en vapor o tipo III), y con temperaturas superiores a los 370°C, se consideran como representativas de los fluidos más profundos.
9. Considerando la intensa alteración hidrotermal que han afectado las rocas (reacciones tipo hidrólisis), resulta difícil utilizar los datos de geoquímica de elementos MMT para clasificar las mismas en los diferentes diagramas petrogenéticos propuestos en la literatura, aunque si permitió establecer algunas diferencias químicas entre las diferentes variedades litológicas, correlacionables con la mineralogía fundamentalmente de la alteración hidrotermal.
10. El conjunto de datos anteriormente descritos, permiten sugerir que en el sector objeto de estudio se presentan evidencias de por lo menos dos eventos hidrotermales que dieron lugar a dos ambientes de alteración hidrotermal: serícítico y argílico avanzado. Por otro lado, ese sector presenta el registro de varios pulsos de fluidos, los cuales podrán ser mejor interpretados, con una mayor densidad de datos de IF para todo el distrito de Vetas-California.

## 7. RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar un estudio de inclusiones fluidas más regional con el ánimo de relacionar los paleofluidos con los cuerpos plutónicos emplazados en el área de California.

## BIBLIOGRAFIA

Albinson Tawn. (2000). Fluid Inclusion Study of Samples B-026115, B-026476 and B-027534. Microtermometría y Asesoría Geológica-Minera, S.A. (MAGSA).

Díaz, L. Guerrero, M. (2006). Asociaciones Mineralógicas de las Menas Auroargentíferas y su Distribución Espacial en el Yacimiento de Angostura (California Santander). Proyecto de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Forero, R. (2010). Paragénesis Mineral en Brechas Mineralizadas del Sector de La Mascota, California. Proyecto de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Felder, F. *et al.* (2006) Angostura Project, a High Sulfidation Gold-Silver Deposit Located in the Santander Complex of North Eastern Colombia. Paper presentado en el Simposio de Oro, Lima, Perú.

Mangas, J. y Sierra J. (2004). Las inclusiones fluidas: Método de análisis e interpretación. Universidad de La Palmas de Gran Canaria. 146p.

Mathur, R. *et al* (2003). Re-Os isotopes applied to the epithermal gold deposits near Bucaramanga, northeastern Colombia. Journal of South American Earth Sciences, N° 15, pp. 3-52.

Mantilla, L. C. (2003). Guía de Laboratorio de Petrología Ígnea. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Geología.

Mantilla, L. C. *et al*, (2009). Geocronología U-Pb de los cuerpos porfiríticos del distrito aurífero de Vetas-California (departamento de Santander, Colombia). Boletín de Geología, Vol. 31, Nº 1., pp. 31-43.

Mera P. V. (2009). Geoquímica y Geocronología de los complejos intrusivos en el Sureste de Chiapas, México. Proyecto de Maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México. Departamento de Geología, Ciudad de México.

Mendoza, H. y Jaramillo, L. (1979). Geología y Geoquímica del Área de California, Santander. Boletín Geológico, Vol. 22, No. 2., pp. 1-98.

Mier, R. (1990). Manual de laboratorio de mineralogía óptica. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Geología.

Ortega, L. (2007). Tipología y Condiciones de Formación de las Manifestaciones Hidrotermales del Sector Esmeraldífero Pena Coscuez (Municipio de San Pablo de Borbur, Boyaca). Proyecto de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Pinto, E. (1991). Geología y evaluación de la mina La Bodega, Municipio de Santander-California. Proyecto de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Polania, J. (1982). Mineralizaciones de Uranio y otros metales en California (Santander del Sur). Geología Norandina. No 6. pp. 57-65

Robert, J. Bodnar. (2003). Introduction to Aqueous-Electrolyte Fluid Inclusions. Fluid Inclusions, Analysis and Interpretation, Vol. 32, pp. 81-100

Rollinson, H. (1993). Using Geochemycal Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman. England, 352 p.

Shaw, R. (2000). Gold mineralization in the Northern Andes: Magmatic vs Mtallogeny. XI International Mining Congress, Bogotá, Colombia.

Sorby, H. (1858). On the microscopical structure of cristal indicating the origin of rocks and minerals. Q. J. Geol. Soc. London, 14, pp 453-500

Uribe, A. (2010). Génesis y caracterización de la manifestación hidrotermal en el área de Berlin (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). Proyecto de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.

Velasco, F. (2004). Introducción al Estudio de la Inclusiones Fluidas. XXIII curso Latinoamericano de Metalogenia, Mendoza, Argentina, 97p.

Ward, D y otros. (1970). Recursos Minerales de parte de los Departamentos de Norte de Santander y Santander. Boletín Geológico. U.S. Geological survey, INGEOMINAS. Vol. 17, No. 3.

Ward, D y otros. (1976). Geología de los cuadrángulos H12 Bucaramanga, departamento de Santander y H13 Pamplona, departamento de Norte de Santander. U.S. Geological survey, INGEOMINAS.

## Paginas web

- Greystar resources, 2010. Proyecto Angostura. Consultado el 08 de Septiembre de 2010. <http://www.greystarresources.com/s/Projects.asp?ReportID=95453>
- Municipio de California, 2010. California en Santander. Consultado el 1 de septiembre de 2010. <http://www.california-santander.gov.co/calendario/nuestromunicipio.shtml?apc=m-m1--&x=1994103>
- Municipio de California, 2008. Mapa Político de California. Consultado el 1 de septiembre de 2010. <http://www.california-santander.gov.co/sitio.shtml?apc=m-m2--&x=1814662>.
- Minerales.com, 2010. Minerales – torbernita, Consultado el 15 de diciembre de 2010, <http://www.mineral-s.com/torbernita.html>.
- Minerales.com, 2010. Minerales – calcantita, Consultado el 15 de diciembre de 2010 <http://www.mineral-s.com/calcantita.html>.
- Microscopía electrónica: aplicaciones a la cristalografía, consultado el 20 de febrero de 2011, [http://www.rpsqualitas.es/documentacion/downloads/instrumental/sem-edx\\_aplicaciones\\_de\\_la\\_microscopia\\_electronica\\_a\\_la\\_cristalografia.pdf](http://www.rpsqualitas.es/documentacion/downloads/instrumental/sem-edx_aplicaciones_de_la_microscopia_electronica_a_la_cristalografia.pdf).
- Laboratorio de microsonda de la Universidad de California, Santa Bárbara. Consultado el 28 abril de 2011. <http://www.geol.ucsb.edu/faculty/hacker/probe.html>.
- Estévez G. et al. 2008. Plan de Desarrollo. Consultado el 22 de abril de 2011. <http://www.california-santander.gov.co/apc-aa->

files/64383037613831343764623933326633/PLAN\_DE\_DESARROLLO\_2008  
\_2011.pdf.

- Goodge J, 2011. Electron probe micro-analyzer. Consultado el 29 de abril de 2011,  
[http://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/EPMA.html](http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/EPMA.html).

### **Programas utilizados**

- Bakker Ronald J., ISOC, Versión 08/02.
- R. Richard L., Minpet (Mineralogical and petrological data processing system), Version 2.02 (1988-1995).