

Universidad Nacional
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Escuela de Ciencias Biológicas
Licenciatura en Biología con Énfasis en Manejo de Recursos Naturales

**Evaluación del género *Camelobaetidius* Demoulin, 1966 (Ephemeroptera:
Baetidae) como indicador para el monitoreo de quebradas y ríos en Costa
Rica**

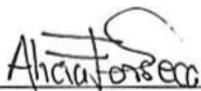
**Trabajo final de graduación presentado como requisito parcial para
optar al grado de Licenciatura en Biología con Énfasis en Manejo de
Recursos Naturales**

Fabián Alb. Sibaja Araya

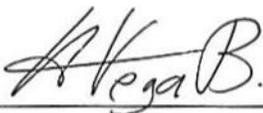
Campus Omar Dengo

Heredia, 2020

Este trabajo de graduación fue aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales.



M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez
Representante, Decano, quién preside



Licda. Hannia Vega Bolaños
Representante, Unidad Académica



Dr. Meyer Guevara Mora
Tutor



M. Sc. Silvia Echeverri Sáenz
Asesora



Lic. Mauricio Herrera Campos
Invitado especial

Índice de Contenido

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
1. Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Planteamiento del problema.....	5
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 General:.....	5
1.4.2 Específicos:.....	5
2. Capítulo II: Marco Teórico.....	5
3. Capítulo III: Marco Metodológico.....	7
3.1 Área de estudio y muestreo.....	7
3.2 Revisión taxonómica.....	9
3.3 Vulnerabilidad a la contaminación y tolerancia de <i>Camelobaetidius</i>	10
3.4 Análisis estadístico.....	12
4. Capítulo IV: Resultados.....	13
4.1 Revisión taxonómica.....	13
4.2 Clave tentativa para distinguir las ninfas de las morfoespecies de <i>Camelobaetidius</i> encontradas en el presente estudio.....	13
4.3 Zonas de Influencia.....	31
4.4 Vulnerabilidad a la contaminación y tolerancia de <i>Camelobaetidius</i>	33
4.5 Distribución según vertientes y rango altitudinal.....	34
5. Capítulo V: Discusión.....	36
5.1 Revisión taxonómica.....	36
5.2 Zonas de Influencia y vulnerabilidad a la contaminación.....	36
5.3 Vulnerabilidad a la contaminación y tolerancia en <i>Camelobaetidius</i>	39
5.4 Distribución según vertientes y rango altitudinal.....	41
6. Capítulo VI: Conclusiones.....	42
7. Recomendaciones.....	43
8. Referencias bibliográficas.....	44
9. Anexos.....	58

Índice de Cuadros y Figuras

Cuadro 1. Coberturas de uso de la tierra en las Zonas de Influencia y morfoespecies presentes.	31
Cuadro 2. Morfoespecies presentes según la vulnerabilidad a la contaminación en las Zonas de Influencia.	34
Figura 1. Puntos de muestreo utilizados, los números del 1–28 corresponden respectivamente a los anexos 5.1–5.28.....	8
Figura 2. Uñas a) grupo 1, b) grupo 2; mandíbulas grupo 1, c) con incisivos similares en tamaño, d) con incisivo externo más largo que los demás; mandíbulas grupo 2, e) con incisivos similares en tamaño, f) con incisivo externo más largo que los demás; paraproctos g) grupo 1, h) grupo 2.....	14
Figura 3. <i>Camelobaetidius guaycara</i> coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal	18
Figura 4. <i>Camelobaetidius sp.</i> 8. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	19
Figura 5. <i>Camelobaetidius sp.</i> 7. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	20
Figura 6. <i>Camelobaetidius sp.</i> 9. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	21
Figura 7. <i>Camelobaetidius sp.</i> 11. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	22
Figura 8. <i>Camelobaetidius sp.</i> 4. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	23
Figura 9. <i>Camelobaetidius sp.</i> 10. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	24
Figura 10. <i>Camelobaetidius sp.</i> 13. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	25
Figura 11. <i>Camelobaetidius sp.</i> 3. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	26
Figura 12. <i>Camelobaetidius sp.</i> 12. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	27
Figura 13. <i>Camelobaetidius sp.</i> 5. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	28
Figura 14. <i>Camelobaetidius sp.</i> 2. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	29
Figura 15. <i>Camelobaetidius sp.</i> 6. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.	30
Figura 16. Distribución altitudinal de las morfoespecies encontradas en los sitios de muestreo.	35
Figura 17. Cantidad de morfoespecies registradas cada 200 metros en el gradiente altitudinal registrado, con "n" como cantidad de sitios de muestreo.	35

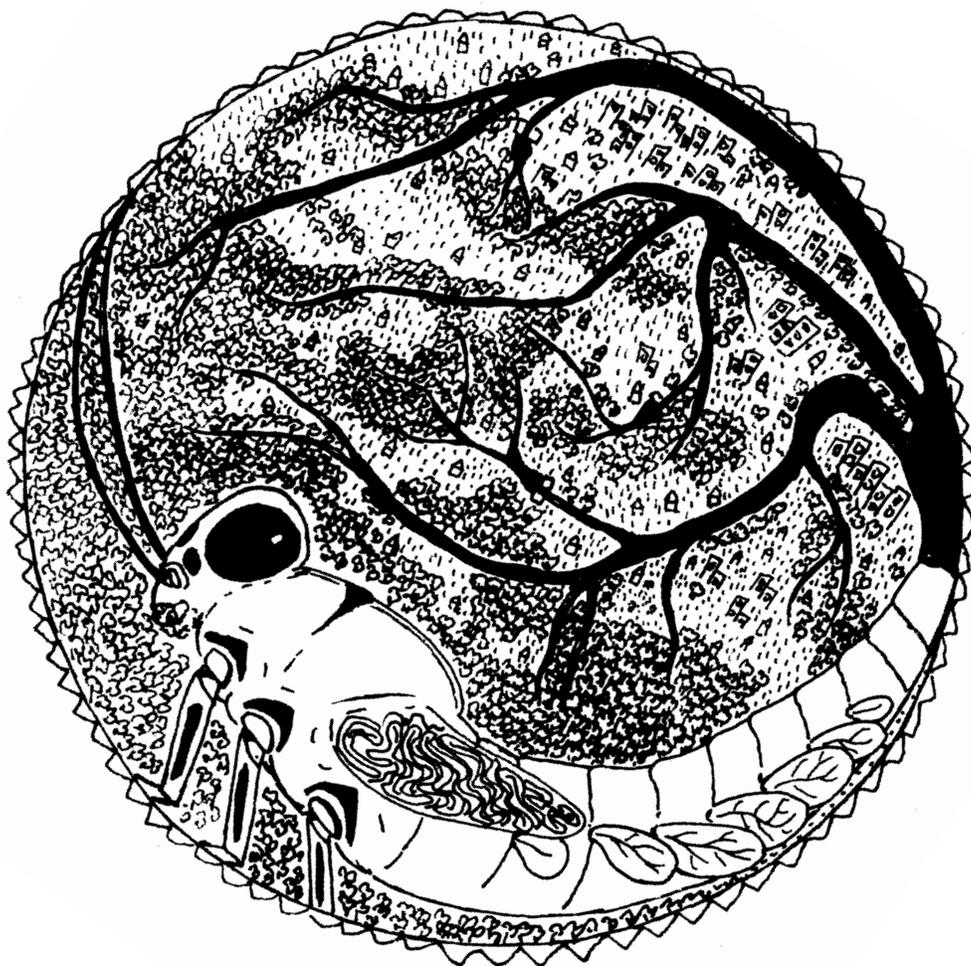
Índice de Anexos

Anexo 1.1 Material examinado para la revisión taxonómica.....	58
Anexo 1.2 Metodología de recolecta de macroinvertebrados según Decreto 33903-MINAE-S (2007)	65
Anexo 2. Clasificación Corine Land Cover Costa Rica utilizada en la presente investigación.....	67
Anexo 3. Características diagnósticas de las especies <i>Camelobaetidius maidu</i> , <i>Camelobaetidius variabilis</i> , <i>Camelobaetidius kondratieffi</i> , y <i>Camelobaetidius shepardii</i> ..	76
Anexo 3.1. <i>Camelobaetidius maidu</i> Jacobus & McCafferty 2005, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.	76
Anexo 3.2. <i>Camelobaetidius maidu</i> Jacobus & McCafferty 2005, ninfa. a) labio (izquierda v. d., derecha v. v.), b) uñas, c) espinas del IV tergo abdominal, d) paraprocto.	77
Anexo 3.3. <i>Camelobaetidius variabilis</i> Wiersema 1998, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.	78
Anexo 3.4. <i>Camelobaetidius variabilis</i> Wiersema 1998, ninfa. a) labio (izquierda v. d., derecha v. v.), b) uñas, c) espinas del IV tergo abdominal, d) paraprocto.	79
Anexo 3.5. <i>Camelobaetidius kondratieffi</i> Lugo-Ortiz & McCafferty 1995, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.....	80
Anexo 3.6. <i>Camelobaetidius kondratieffi</i> Lugo-Ortiz & McCafferty 1995, ninfa. a) labio (izquierda v. d., derecha v. v.), b) uñas, c) espinas del IV tergo abdominal, d) paraprocto.	81
Anexo 3.7. <i>Camelobaetidius shepardii</i> Randolph & McCafferty 2001, ninfas. Coloración, A-B) machos, C) hembra.....	82
Anexo 3.8. <i>Camelobaetidius shepardii</i> Randolph & McCafferty 2001, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.....	83
Anexo 3.9. <i>Camelobaetidius shepardii</i> Randolph & McCafferty 2001, ninfa. labio (izquierda v. d., derecha v. v.), a) hembra, b) macho.	84
Anexo 3.10. <i>Camelobaetidius shepardii</i> Randolph & McCafferty 2001, ninfa. a) uñas, b) espinas del IV tergo abdominal, c) paraprocto.....	85
Anexo 4. Porcentaje de validación para las Zonas de Influencia.	86
Anexo 5. Mapas de coberturas de uso de la tierra para los 28 sitios de muestreo.....	88
Anexo 5.1. Zona de influencia para Quebrada Borbón	88
Anexo 5.2. Zona de influencia para Quebrada Seca.....	89
Anexo 5.3. Zona de influencia para Quebrada Tortuga	90
Anexo 5.4. Zona de influencia para Río Cañas	91
Anexo 5.5. Zona de influencia para Río Ciruelas.....	92
Anexo 5.6. Zona de influencia para Río Guacimal	93
Anexo 5.7. Zona de influencia para Río Jiménez.....	94
Anexo 5.8. Zona de influencia para Río Peje	95
Anexo 5.9. Zona de influencia para Río San Rafael	96
Anexo 5.10. Zona de influencia para Río Tibás	97
Anexo 5.11. Zona de influencia para Quebrada Poza Azul.....	98
Anexo 5.12. Zona de influencia para Quebrada Playa Hermosa.....	99

Anexo 5.13. Zona de influencia para Quebrada Segunda	100
Anexo 5.14. Zona de influencia para Quebrada Tambor	101
Anexo 5.15. Zona de influencia para Río Ángel	102
Anexo 5.16. Zona de influencia para Río Aquiares	103
Anexo 5.17. Zona de influencia para Río Atirro	104
Anexo 5.18. Zona de influencia para Río Bonilla	105
Anexo 5.19. Zona de influencia para Río Chirripó	106
Anexo 5.20. Zona de influencia para Río Claro	107
Anexo 5.21. Zona de influencia para Río Colima	108
Anexo 5.22. Zona de influencia para Río San Luis	109
Anexo 5.23. Zona de influencia para Río Porrosatí	110
Anexo 5.24. Zona de influencia para Río Torito	111
Anexo 5.25. Zona de influencia para Quebrada Manigordo	112
Anexo 5.26. Zona de influencia para Quebrada Negra	113
Anexo 5.27. Zona de influencia para Río Blanco	114
Anexo 5.28. Zona de influencia para Río Sombrero	115

Dedicatoria

Para todos los amantes del mundo natural que con su pasión inspiran a la investigación de la vida silvestre y sus misterios; a mis seres queridos por todo su apoyo emocional durante el proceso de este trabajo logrado con gran dedicación y esmero; a mis colaboradores por su apoyo financiero, logístico, y técnico que motivaron mis esfuerzos hasta el final de esta obra; y especialmente a la juventud costarricense que ha heredado la responsabilidad de conservar y proteger un recurso hídrico enfermo por el desarrollo socioeconómico descuidado del medio ambiente.



El agua no es solamente un recurso natural, es fuente de vida.

Agradecimientos

Al equipo de biólogos del Laboratorio de Entomología de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional (LEUNA, Código SIA 0484–18), Francisco Bravo Chavarría, Carlos Esquivel Herrera, Meyer Guevara Mora, Randall Montoya Solano, David Romero Serrano y Óscar Vásquez Bolaños, a la bióloga Silvia Echeverría Sáenz del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET-UNA), al Fondo para el Fortalecimiento de las Capacidades Estudiantiles (FOCAES, UNA), a la geógrafa Geannina Moraga López colaboradora del Laboratorio de Hidrología de la Escuela de Ciencias Biológicas de la UNA, al biólogo Mauricio Herrera Campos del Laboratorio de Zoología de la Escuela de Ciencias Biológicas de la UNA, al Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) y al Laboratorio PRIAS PRIAS, a la geógrafa Francini Acuña Piedra especialista en sensores remotos y teledetección, a los entomólogos Luke Jacobus de la Universidad de Purdue (EUA) y Frederico Falcão Salles de la Universidad Federal de Viçosa (Brasil), y al biólogo Rafael Boldrini de la Universidad Federal de Roraima (Brasil).

Resumen

El estudio de los insectos acuáticos se ha fomentado en los últimos años gracias a su utilidad en la bioindicación de cambios en los ecosistemas lóticos asociados al desarrollo socioeconómico. Sin embargo, existen vacíos de información de órdenes sensibles al deterioro ambiental como Ephemeroptera, lo cual limita su utilización como bioindicador. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue Evaluar el potencial de bioindicación del género *Camelobaetidius* Demoulin, 1966 (Ephemeroptera, Baetidae) de acuerdo con su presencia o ausencia en distintos ecosistemas lóticos de Costa Rica. Para esto, se seleccionaron muestras de este género en 28 quebradas y ríos de diferentes regiones rurales y urbanas del país, depositadas en tres colecciones de insectos acuáticos de la Universidad Nacional; dichas muestras se analizaron taxonómicamente y en los sitios de estudio se caracterizó a macroescala la vulnerabilidad a la contaminación mediante Zonas de Influencia (ZI) con ayuda de Sistemas de Información Geográfico. Como resultado, se identificó la especie *C. guaycara* y se caracterizaron morfológicamente 12 diferentes morfoespecies, las cuales se categorizaron como "muy tolerantes", "algo tolerantes" y "poco tolerantes", de acuerdo con ocho ZI con alta vulnerabilidad a la contaminación, 16 con vulnerabilidad media y cuatro con vulnerabilidad baja; por consiguiente, diferentes aplicaciones de bioindicación se definieron para estos organismos según las regiones del país donde se registraron. Además, la distribución de morfoespecies se encontró estadísticamente relacionada con su ubicación en las vertientes y el gradiente altitudinal, lo cual ayuda a explicar la diversificación de Ephemeroptera en el neotrópico y provee de información aplicable en el monitoreo de la variabilidad climática. Finalmente, cabe resaltar la importancia de la investigación conjunta de insectos acuáticos y macroescalas de degradación en ecosistemas lóticos, la cual puede profundizar en los efectos del desarrollo socioeconómico de la región latinoamericana sobre la biodiversidad asociada a sus quebradas y ríos.

1. Capítulo I: Introducción

1.1 Antecedentes:

El estudio de los macroinvertebrados bentónicos se ha impulsado en Latinoamérica gracias a su utilización como indicadores biológicos para el monitoreo y la valoración de la calidad de las aguas superficiales en quebradas y ríos (Buss *et al.*, 2015; Roldán-Pérez, 2016), estos indicadores se definen como organismos con una determinada tolerancia a condiciones específicas de calidad de agua (Alba-Tercedor & Sánchez-Ortega, 1988; Peinador, 2004; Buss & Salles, 2007; Barman & Gupta, 2015; Kubendran *et al.*, 2017). Con ventajas de aplicación como bajo costo, detección tanto de tendencias temporales de calidad como incidentes que puedan comprometer la integridad del medio o del ecosistema, en comparación con valoraciones fisicoquímicas del agua con costos superiores y una detección de contaminación limitada al momento de recolecta de la muestra (Hellowell, 1986; Alba-Tercedor, 1996; Springer, 2010; Carter *et al.*, 2017).

En Costa Rica (CR), el uso de esta fauna bentónica para la valoración de la calidad del agua tuvo sus primeras aplicaciones en la provincia de Heredia, específicamente en la subcuenca del río Virilla (Charpentier & Tabash, 1988; Craig, 1992), y posteriormente en diferentes cuencas hidrográficas a lo largo del país (Flowers *et al.*, 1995; Peinador, 2004; Mafla, 2005). Dada su utilidad, los macroinvertebrados acuáticos se consolidaron como herramienta de monitoreo en CR mediante la creación del Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (Decreto 33903-MINAE-S, 2007), y la inclusión del índice Biological Monitoring Working Party (BMWP), adaptado a partir Alba-Tercedor y Sánchez-Ortega (1988).

Asimismo, mediante la utilización de macroinvertebrados en el monitoreo de ecosistemas lóticos en el país, se han demostrado los impactos negativos de diferentes coberturas de la tierra sobre la calidad del agua. En este sentido, se ha observado una reducción de la diversidad y abundancia de dichos organismos en sitios influenciados por cultivos extensivos tales como arroz, banano y piña (Castillo *et al.*, 2006; Echeverría-Sáenz *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2013; Echeverría-Sáenz *et al.*, 2016), a lo largo de distintas áreas

urbanas, agropecuarias y conservadas en un mismo río (Auquilla *et al.*, 2006; Kohlmann *et al.*, 2015; Rasmussen *et al.*, 2016; Fournier *et al.*, 2018; Mena-Rivera *et al.*, 2017); y por fuentes puntuales de contaminación, como las originadas en beneficios de café (Fernández & Springer, 2008).

Por su parte, para mitigar los impactos derivados del desarrollo humano sobre la calidad de los cuerpos de agua superficial en el país, la legislación establece medidas para la conservación y reforestación de los bosques ribereños (Ley 276, 1942); y áreas boscosas de amortiguamiento para quebradas y ríos en zonas urbanas (10–50 m), rurales (15–50 m), lagos naturales o artificiales (50 m), y nacientes (100 m) (Ley 7575, 1996; Reglamento 25721, 1997). También, se prohíbe a personas naturales y jurídicas contaminar de forma directa o indirecta las aguas superficiales con diferentes residuos (Ley 5395, 1973); y regulación para el desecho de distintos vertidos (Reglamento 33601-MINAE-S, 2007).

En cuanto a los taxa reconocidos como macroinvertebrados, en su mayoría están representados por insectos junto con otros grupos como Crustacea, Hirudinea, Mollusca, Oligochaeta y Turbellaria, los cuales tienen un amplio rango de tolerancia a la contaminación acuática (Decreto 33903-MINAE-S, 2007). Asimismo, la utilización exclusiva de órdenes de Insecta como Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (EPT) ha sido considerada suficiente para proporcionar información sobre la salud de los cuerpos de agua; sin embargo, es importante considerar que este análisis muestra solamente una parte de la comunidad bentónica (Barbour *et al.*, 1999; Bain *et al.*, 2000; Kitchin, 2005; Herman & Nejadhashemi, 2015).

De dichos órdenes, Ephemeroptera presenta 16 familias en el neotrópico (Barber-James *et al.*, 2008; Sartori & Brittain, 2015), de las cuales 10 se encuentran en CR y son reconocidas por encontrarse desde aguas limpias hasta sitios con moderada contaminación (Flowers & De la Rosa, 2010; Hanson *et al.*, 2010). En cuanto a su valor específico como indicadores de calidad de agua según el BMWP-CR, siete de sus familias presentan puntajes bajos por su tolerancia a aguas con niveles intermedios de contaminación orgánica: Caenidae (4), Baetidae (5), Leptoheptageniidae (5), Oligoneuriidae (5), Polymitarcyidae (5), Euthyplociidae (6) e Isonychidae (6); mientras que dos familias tienen

puntajes altos por su preferencia a aguas limpias: Leptophlebiidae (8) y Heptageniidae (9) (Decreto 33903-MINAE-S, 2007).

Por su parte, la mayor diversidad genérica en el orden Ephemeroptera la presenta Baetidae con 29 géneros neotropicales, de los cuales 15 se registran en CR y pueden encontrarse exclusivamente en la región neotropical o distribuirse hasta la región Neártica, como *Camelobaetidius* (Demoulin, 1966) desde Argentina hasta Canadá (Lehmkuhl, 1976; Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995; Barber-James *et al.*, 2008; Gattolliat & Nieto, 2009; Hanson *et al.*, 2010), el cual es considerado como muy común en cuanto a su abundancia en quebradas y ríos torrentosos y tolerante a aguas con distintos grados de contaminación (Peinador, 2004; Flowers & De la Rosa, 2010; Municipalidad de Curridabat, 2015). En cuanto a las especies registradas en el país, se han encontrado adultos de *C. arriaga*, y ninfas de *C. guaycara*, *C. kondratieffi*, *C. musseri*, y *C. warreni*, en elevaciones bajas y medias de diferentes regiones (Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995; Wiersema & Baumgardner, 2000; McCafferty 2011a; Sibaja-Araya & Esquivel, 2018).

1.2 Justificación

Actualmente, los ecosistemas lóticos en Costa Rica se ven afectados en sus cuencas hidrográficas por diferentes usos de la tierra como el urbano, los cultivos agrícolas y las pasturas, los cuales afectan directamente la calidad de agua (Castillo *et al.*, 2006; Fernández & Springer, 2008; Echeverría-Sáenz *et al.*, 2012; Kohlmann *et al.*, 2015; Fournier *et al.*, 2018; Mena-Rivera *et al.*, 2017); lo que ha provocado que 25 de las 34 cuencas se encuentren con diversos contaminantes, principalmente en Gran Área Metropolitana (GAM) (Varela, 2007; Contraloría General de la República, 2013). Por tanto, esto puede interpretarse a nivel biológico como una disminución generalizada en la diversidad y abundancia de los macroinvertebrados bentónicos con mayor sensibilidad a cambios ambientales.

Además, debe considerarse que el territorio nacional se encuentra en una región reconocida como el “Hot Spot” de variabilidad climática más prominente a nivel tropical, donde se registra, en los últimos años, una reducción en la cantidad de las precipitaciones, así como un aumento en su variabilidad y frecuencia de periodos con menos caudal en la

red fluvial (Maurer *et al.*, 2009; Diffenbaugh & Giorgi, 2012; Imbach *et al.*, 2015). Asimismo, se ha sugerido que este fenómeno climático tiene el potencial de provocar una disminución en la resiliencia de comunidades bentónicas de agua dulce, principalmente las de macroinvertebrados (Daufresne *et al.*, 2007; Mantyka-Pringle *et al.*, 2014).

En su mayoría, dichos macroinvertebrados son insectos acuáticos con una amplia tolerancia a las alteraciones ambientales, donde géneros como *Camelobaetidius* (Ephemeroptera: Baetidae) presentan ninfas que pueden encontrarse en cuerpos de agua cuyas condiciones naturales presentan variadas alteraciones por distintas coberturas de uso de la tierra (Peinador, 2004; Buss & Salles, 2007; Valverde *et al.*, 2009; Bertaso *et al.*, 2015; Dedieu *et al.*, 2015; Municipalidad de Curridabat, 2015; Firmiano *et al.*, 2017). Por tanto, este género presenta un importante potencial de bioindicación, que podría ser utilizado para profundizar el conocimiento sobre las respuestas de los organismos bentónicos a cambios en los ambientes acuáticos del neotrópico (Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, 2014; Carrie *et al.*, 2017).

También, la utilización de este género como indicador biológico es necesaria para ampliar el uso de macroinvertebrados en el monitoreo de los cuerpos de agua superficial en Latinoamérica, cuyos protocolos mantienen la identificación de los organismos a un nivel taxonómico mínimo de familia (33903-MINAE-S, 2007; Alonso-Eguía *et al.*, 2014; Roldán-Pérez, 2016). En este sentido, la aplicación de indicadores taxonómicos a nivel de género y especie ha sido exitosamente utilizada principalmente en regiones de Europa, Brasil, y Estados Unidos, donde se ha comprobado que pueden ser más efectivos que otros niveles taxonómicos para discriminar sitios con condiciones variadas de degradación de la calidad del agua (Buss & Vitorino, 2010; Buss *et al.*, 2015).

Sin embargo, la utilización de *Camelobaetidius* para fines de bioindicación está limitada en Costa Rica por deficiencias taxonómicas que impiden la identificación de las especies registradas en el país, las cuales también carecen de información sobre el estado de conservación de los cuerpos de agua superficial donde se encontraron (Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995; Wiersema & Baumgardner, 2000; McCafferty, 2011a; Sibaja-Araya & Esquivel, 2018). Por consiguiente, es necesario revisar la taxonomía de este género y analizar su hábitat en variados ecosistemas lóticos del país, para estimar el alcance de sus

especies como bioindicadores y su uso complementario o alternativo a otras herramientas como el BMWP-CR (Bailey *et al.*, 2001; Schmidt-Kloiber & Nijboer, 2004, Feio *et al.*, 2006; Buss & Salles, 2007; Decreto 33903-MINAE-S, 2007; Kubendran *et al.*, 2017).

1.3 Planteamiento del problema

¿Cómo se distribuye el género *Camelobaetidius* en relación a diferentes quebradas y ríos de Costa Rica?

1.4 Objetivos

1.4.1 General:

- Evaluar el potencial de bioindicación del género *Camelobaetidius* de acuerdo con su presencia o ausencia en distintos ecosistemas lóticos de Costa Rica para el fortalecimiento de la utilización de los insectos acuáticos en el monitoreo del recurso hídrico.

1.4.2 Específicos:

- Describir taxonómicamente el género *Camelobaetidius* con el fin de mejorar su identificación para su aprovechamiento en el monitoreo de cuerpos de agua superficial del país.
- Caracterizar la influencia de las coberturas de uso de la tierra sobre diferentes ecosistemas lóticos del territorio nacional a partir de macroescalas de degradación ambiental para estimar su vulnerabilidad a la contaminación.
- Relacionar la presencia o ausencia de *Camelobaetidius* respecto a la vulnerabilidad a la contaminación en diversas regiones geográficas para evaluar su potencial como bioindicador en el monitoreo de quebradas y ríos.

2. Capítulo II: Marco Teórico

Respecto al hábitat de *Camelobaetidius*, se le puede encontrar en quebradas torrentosas y ríos de elevaciones bajas y medias entre 289–2900 msnm (Galdean *et al.*, 2000; Montoya, 2008; Gutiérrez & Reinoso-Flores, 2010; Gutiérrez & Dias, 2015), en

sustratos de arena, grava, rocas, hojarasca y vegetación (Forero-Céspedes & Reinoso-Flores, 2013; Santamaria & Vega, 2016; Pillasagua, 2018). Además, se ha encontrado relación entre su presencia y algunas características morfológicas de dichos cuerpos de agua tales como orden, ancho de cauce, y profundidad (Braun *et al.*, 2014; Ferreira *et al.*, 2014; Melo *et al.*, 2018), así como correlaciones positivas con propiedades fisicoquímicas del agua como alcalinidad, conductividad eléctrica, dureza carbonácea, iones de Cl^- y Ca^{+2} , oxígeno disuelto, pH, sólidos disueltos y sedimentables, y transparencia (Fernández & Springer, 2008; Salvarrey *et al.*, 2014; Dedieu *et al.*, 2015; Mosquera-Guerra, 2015; Rúa *et al.*, 2015; Pillasagua, 2018).

Por tanto, la presencia de *Camelobaetidius* depende de una combinación de factores, lo que puede explicar su variada tolerancia a las alteraciones ambientales, caracterizada por su presencia en sitios con influencia de coberturas agropecuarias, boscosas y urbanas, con una calidad del agua desde buena a muy mala (Municipalidad de Curridabat, 2015; Ríos *et al.*, 2015; Rúa *et al.*, 2015; Aguirre, 2017; García-Alzate *et al.*, 2017; Firmiano *et al.*, 2017; Villada-Bedoya *et al.*, 2017; Pillasagua, 2018; Ramírez *et al.*, 2018). Sin embargo, estos atributos son a nivel genérico, con solamente dos de sus especies en Brasil categorizadas como “algo sensibles” a la contaminación de acuerdo con sus preferencias fisicoquímicas (Buss & Salles, 2007), por lo que el potencial bioindicación del género en su mayoría no ha sido explorado.

Respecto a la gestión del recurso hídrico, esta enfrenta factores generales de vulnerabilidad como la demanda, disponibilidad, infraestructuras para el aprovechamiento, instituciones reguladoras, y variabilidad climática; los cuales requieren un manejo integrado, que se define como un proceso de desarrollo coordinado y administración del agua, tierra y recursos relacionados, para maximizar el bienestar socioeconómico sin comprometer los ecosistemas vitales (Padowski *et al.*, 2015; Stathatou *et al.*, 2016; Setegn & Donoso, 2015). En CR, la gestión del saneamiento por parte de las instituciones reguladoras es el principal factor de vulnerabilidad a la contaminación en las quebradas y ríos, lo cual representa un reto a futuro debido a los severos problemas de degradación de estos cuerpos de agua tanto en zonas urbanas como rurales (Varela, 2007; Contraloría

General de la República, 2013; Kohlmann, 2015; Arana, 2016; Fournier *et al.*, 2018; Mena-Rivera *et al.*, 2017).

A nivel ecológico, dicha vulnerabilidad a la contaminación puede definirse como la posibilidad de afectación por las coberturas de uso de la tierra en las zonas de captación de la cuenca hidrográfica, que pueden influenciar de forma sinérgica la calidad del agua (definida por sus características físicas, químicas y biológicas Spellman, 2010) de los ecosistemas lóticos mediante la erosión, sedimentación, enriquecimiento de nutrientes, contaminación, alteración hidrológica, pérdida de bosque ribereño y material vegetal (Cooper, 1993; Allan, 2004; Giri & Qiu, 2016). Con un crecimiento urbano que produce incrementos en residuos líquidos y sólidos; intensificación agrícola que genera aumentos en plaguicidas y macronutrientes; y áreas de pastoreo que conllevan al incremento de sedimentos, mientras que en ambientes boscosos sin actividades antropogénicas los únicos cambios están relacionados con las variaciones hidrológicas y geológicas (Hubbard *et al.*, 2004; Baker, 2005; Ganong *et al.*, 2015; McGrane, 2016).

Por tanto, las coberturas de uso de la tierra son fuertes predictores de los efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua, lo cual se refleja a nivel de comunidades de macroinvertebrados bentónicos como transformaciones en sitios puntuales o a lo largo de diferentes coberturas, con los ensamblajes más diversos en ambientes boscosos (Auquilla *et al.*, 2006; Castillo *et al.*, 2006; Hershey *et al.*, 2010; Herman & Nejadhashemi, 2015; Echeverría-Sáenz *et al.*, 2012). Debido a esta relación, las coberturas presentes en un determinado ecosistema lótico pueden considerarse elementos indicadores de la calidad del agua, y son fundamentales en la elaboración de estrategias de monitoreo (Li *et al.*, 2006; Widyastuti & Suprayogi, 2016; Behmel *et al.*, 2016; Stathatou *et al.*, 2016).

3. Capítulo III: Marco Metodológico

3.1 Área de estudio y muestreo

Se analizaron 484 individuos de 76 muestras en alcohol correspondientes a 28 sitios de muestreo, distribuidas en la totalidad de provincias de Costa Rica, permitiendo tener una amplia representación de la distribución geográfica del género; el detalle de cada fecha de

recolecta, nombre del cuerpo de agua, provincia, recolector, individuos analizados, elevación, orden del río, y coordenadas está disponible en el Anexo 1.1. Estas muestras se seleccionaron en el proyecto "Estudio Preliminar de la Ecología y Diversidad del Orden Ephemeroptera en Costa Rica" (código SIA 0230–13), a partir de las colecciones de insectos acuáticos del Laboratorio de Entomología de la Escuela de Ciencias Biológicas (LEUNA), Museo de Zoología (UNA), y la colección de macroinvertebrados acuáticos del Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET-UNA). Su selección se realizó con base en los siguientes criterios: a) representación de áreas urbanas, rurales y boscosas; b) periodo de colecta de la muestra entre 2014–2017, favoreciendo el estado de conservación del material taxonómico y características ambientales recientes; c) rango altitudinal variado (14 a 1762 msnm); y, d) diversas zonas geográficas del país como las regiones Brunca, Central, Chorotega, Huetar Atlántica, Huetar Norte, y Pacífico Central (Fig. 1).

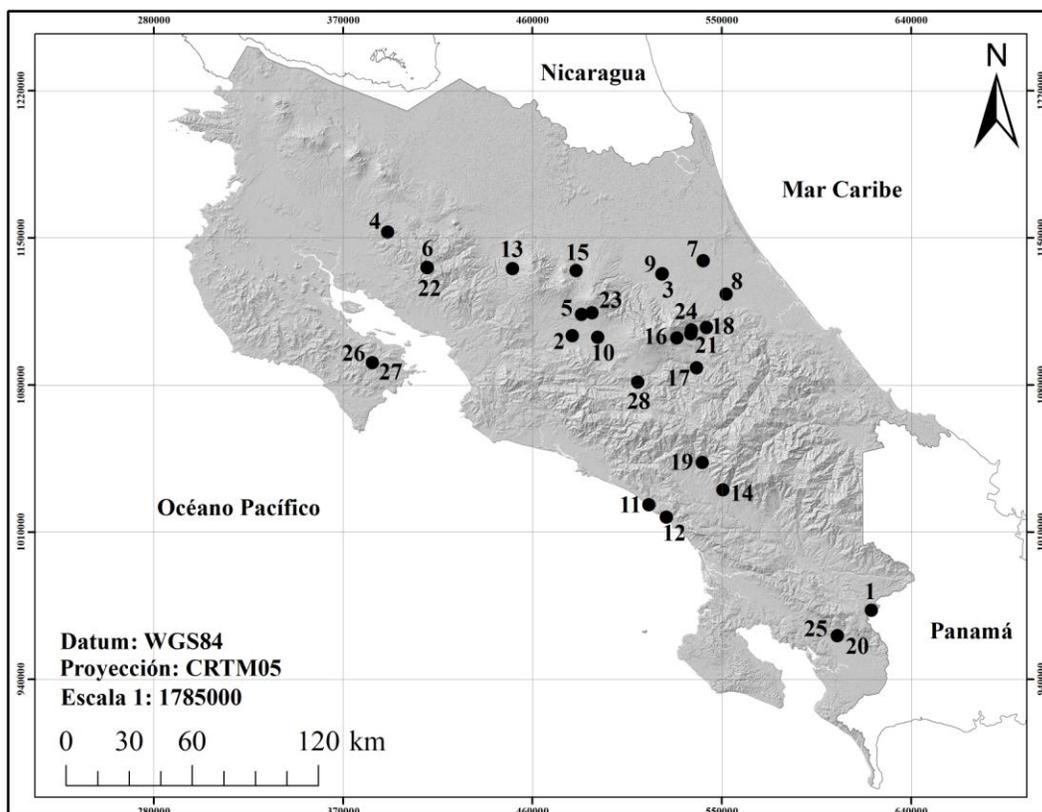


Figura 1. Puntos de muestreo utilizados, los números del 1–28 corresponden respectivamente a los anexos 5.1–5.28.

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en siete de los puntos de muestreo fue utilizada una metodología de recolecta general (puntos 4, 6, 8, 10, 17, 18, 22), como la descrita en el Decreto 33903-MINAE-S (2007) (Anexo 1.2), mientras que las restantes 21 muestras se recolectaron de forma especializada en el microhábitat de *Camelobaetidius*, bajo el proyecto de investigación del LEUNA anteriormente mencionado, para optimizar la captura de ninfas en el campo (muestras recolectadas personalmente en 15 sitios, indicadas como “Col. F. Sibaja” en el Anexo 1.2). En cuanto dicha recolecta especializada, esta se enfocó en las superficies aplanadas rocosas o sedimentarias a lo largo y ancho de los cauces de quebradas y ríos, donde sus poblaciones se encuentran comúnmente; para la recolecta se realizaron raspados sobre dichas superficies con redes de mano rectangulares de 13 x 10 cm o 25 x 13 cm, durante al menos 15 minutos por sitio, y el material se conservó en alcohol al 75%.

3.2 Revisión taxonómica

Se realizó un análisis morfológico que incluyó características reconocidas por diferentes autores como diagnósticas, tales como tamaño, coloración, piezas bucales, osmobranquias coxales, uñas tarsales, espinas de los tergos abdominales y paraproctos (Traver & Edmunds, 1968; McCafferty & Waltz, 1990; McCafferty & Randolph, 2000; Nieto, 2003; Salles & Serrão, 2005; Boldrini & Pes, 2014). Dado que las ninfas de este género no superan los dos centímetros de longitud, fue necesaria la utilización de equipo óptico tal como microscopio (Premiere® MRP-161), estereoscopio (Premiere® SMZ-05), y una cámara digital adaptable al equipo (AmScope®), para fotografiar las características diagnósticas del material analizado.

Además, para la identificación taxonómica se utilizaron las descripciones originales y complementarias de las especies de *Camelobaetidius* reportadas para el país y las descripciones de las demás especies presentes en América Central, Norteamérica y Sudamérica, con el fin de detectar nuevas localidades en su rangos de distribución; también, como material de apoyo se revisaron los paratipos de las especies *C. maidu* Jacobus & McCafferty, 2005, *C. variabilis* Wiersema, 1998, *C. kondratieffi* Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995 and *C. shepardii* Randolph & McCafferty, 2001, facilitados por la Colección de Insectos Acuáticos de la Universidad Purdue (Indiana, Estados Unidos). A

partir de este análisis, se construyó una clave taxonómica tentativa con características diagnósticas ilustradas para distinguir la diversidad del género, y su validación se realizó mediante consultas con expertos en Ephemeroptera: Frederico Falcão Salles, Universidad Federal de Viçosa (Brasil); Luke Jacobus, Universidad Purdue (Indiana, EUA); Rafael Boldrini, Universidad Federal de Rondônia (Brasil); y el entomólogo acuático Carlos Esquivel Herrera.

3.3 Vulnerabilidad a la contaminación y tolerancia de *Camelobaetidius*

Con el fin de definir a macroescala la vulnerabilidad a la contaminación en los 28 sitios de muestreo, se establecieron las coberturas de uso de la tierra dentro de Zonas de Influencia (ZI), que consideraron una escala de "sistema" para abarcar la red fluvial aguas arriba desde cada punto de muestreo y una escala de "segmento" (Frissell *et al.*, 1986; Klemas, 2014), en las cuales se delimitaron 200 metros cuadrados medidos horizontalmente sobre cada margen del río; tomando en cuenta que las coberturas pueden provocar alteraciones en los ambientes lóticos desde distancias menores a 100 m (Davies & Nelson, 1994; Lammert & Allan, 1999; Roy *et al.*, 2003; Sweeney & Newbold, 2014) y que una ZI de 200 m es suficientemente representativa para explicar un alto porcentaje de la variabilidad de la calidad del agua (>50%; Nava-López *et al.*, 2016). Esto, con ayuda del software ArcGIS 10.3© y la red hídrica del Atlas del Instituto Tecnológico de CR 2014, a través de la técnica de fotointerpretación sobre imágenes satelitales RapidEye del 2012 (con apoyo adicional Carta de 2005 y Google Earth Pro), en categorías basadas en el estándar Corine Land Cover (CLC) versión Costa Rica (Rosales, 2016), los cuales fueron insumos facilitados por el laboratorio PRIAS del CeNAT.

Por su parte, con el fin de validar el trabajo de fotointerpretación en el que se clasificaron las diferentes categorías de coberturas de uso de la tierra, para cada una de las ZI se aplicó una matriz de confusión que consiste en una comparación de las coberturas clasificadas contra puntos de validación generados por un experto externo, usando como insumos las mismas ZI e imágenes satelitales mencionadas en el párrafo anterior. El cálculo de la cantidad de los puntos de validación necesarios para cada categoría fue determinado con la fórmula de Chuvieco (2010):

$$\frac{(z^2 \cdot p \cdot q)}{L^2}$$

Donde z es un valor de probabilidad estándar (calculado por el laboratorio PRIAS del CeNAT, y equivalente a 1,28), p es el porcentaje estimado de acierto de la matriz de confusión (90% de probabilidad), q es el porcentaje de errores (10%), L es el nivel permitido de error (10%). Los porcentajes de acierto de la matriz de confusión que alcanzaron el 80% o más se consideraron como categorías válidas.

Además, la resolución de las imágenes satelitales RapidEye 2012 fue de 5x5 m y por tanto presentaron una unidad mínima cartografiada de 25 m². Con la información generada en formato shapefile de ESRI®, se diseñaron mapas para las coberturas de uso de la tierra en las 28 ZI de las quebradas y ríos seleccionadas. También, *a posteriori* se detectó que las imágenes RapidEye y la cartografía del Atlas estaban ligeramente desplazadas entre sí, por lo que las ZI pueden ser asimétricas con márgenes de 150–250 m; lo cual no afecta la fotointerpretación y su validación debido a que las ZI mantienen su representación de las coberturas de uso de la tierra asociadas a las quebradas y ríos analizados, como se muestra en los mapas generados donde el cauce de las quebradas y ríos y el punto de muestreo se encuentran centrados a pesar del error de ± 50 m (Anexos 5).

Asimismo, es importante resaltar que todas las coberturas de uso de la tierra clasificadas fueron conceptualizadas por un panel de expertos para generar una simbología estandarizada para el país (Rosales, 2016). Específicamente, las categorías utilizadas fueron: Banano, Bosque de galería, Bosque denso, Bosque secundario, Café, Caña de azúcar, Charral/Pastos encharalados, Cultivos confinados, Estanques para acuicultura, Hortalizas, Lagunas, Áreas cubiertas de nubes y sombras/Nubes, Océanos y mares/Océano, Otros cultivos anuales, Otros cultivos permanentes, Palma aceitera, Páramo, Parque eólico* (ausente en la clasificación CLC), Pastos arbolados, Pastos limpios, Piña, Plantación forestal, Playas y arenales/Playa arenosa, Red vial/Caminos, Ríos, quebradas y arroyos (yurros)/Ríos, Tacotal, Tierras desnudas o degradadas/ Tierras desnudas, Zonas de extracción minera, Zona urbana continua, y Zona urbana discontinua (Anexo 2).

Por último, de acuerdo con valoraciones conocidas de calidad de agua en algunos de los sitios de muestreo seleccionados (Krishnaswamy *et al.*, 2001; Echeverría-Sáenz *et al.*, 2011; Municipalidad de Belén & Universidad Nacional, 2013; Guevara-Mora & Bonilla-Traña, 2017; Mena-Rivera *et al.*, 2017; Mena-Rivera *et al.*, 2018; Pérez-Rubio & Mende, 2018; Rojas, 2018) y en consideración exclusiva de los porcentajes de coberturas agropecuarias y urbanas donde se originan las fuentes de contaminantes, las 28 ZI fueron clasificadas en tres categorías de vulnerabilidad a la contaminación, definidas como “vulnerabilidad alta” las ZI con áreas urbanas y agropecuarias entre 59–90% (áreas boscosas de 7–36%), “vulnerabilidad media” las ZI con áreas urbanas y agropecuarias entre 5–58% (áreas boscosas de 36–88%), y “vulnerabilidad baja” las ZI con áreas urbanas y agropecuarias entre 0–4% y (áreas boscosas de 74–100%); bajo esta categorización, las ninfas de *Camelobaetidius* fueron respectivamente clasificadas como “muy tolerantes”, “algo tolerantes”, y “poco tolerantes”.

3.4 Análisis estadístico

Mediante el programa estadístico R (R Core Team, 2019) y R Studio (Version 3.6.1) se calcularon, previa comprobación de la normalidad (Test de Shapiro al 95%), correlaciones de Pearson a un 95% de significancia entre variables ambientales en las ZI definidas como: orden del río (Strahler, 1957), elevación en el punto de muestreo, área total de las ZI, fragmentos de cobertura boscosa, y porcentajes de coberturas boscosa, agropecuaria, urbana, charrales y tacotales. Este análisis se llevó a cabo para explicar las relaciones entre los parámetros ambientales determinados para las ZI.

Además, para validar patrones de distribución de las morfoespecies según la vertiente y el rango altitudinal, se realizó un análisis de varianza tipo PERMANOVA (Anderson, 2001) entre la presencia/ausencia de morfoespecies, utilizando como factores de variación la pertenencia a la vertiente (90% de significancia) y la elevación del sitio de muestreo (95% de significancia). El PERMANOVA considera la similitud en la composición de especies entre las distintas observaciones mediante la construcción de una matriz de semejanza (Oksanen *et al.*, 2019). La utilización de la presencia/ausencia de cada uno de las morfoespecies redujo la heterogeneidad de las metodologías utilizadas en la recolecta del material revisado.

4. Capítulo IV: Resultados

4.1 Revisión taxonómica

Se identificó una especie y 12 morfoespecies, las cuales se separaron taxonómicamente por un conjunto de caracteres que incluyen principalmente talla (mm), coloración, mandíbulas, palpos labiales, y uñas tarsales. Además, para facilitar su estudio el grupo se dividió en dos subgrupos distinguidos morfológicamente por la cantidad de dentículos en la uñas tarsales, subgrupo 1 (S1) con uñas de 11 dentículos o menos (Fig. 2a), y subgrupo 2 (S2) con uñas de 24 o más dentículos (Fig. 2b).

Por su parte, el S1 se conformó de nueve morfoespecies que también pueden separarse en dos subgrupos, pero en este caso a partir de la morfología de sus mandíbulas cuyos incisivos tienen dos patrones discernibles, uno con incisivos similares en tamaño (Fig. 2c), y otro con un prominente incisivo externo más largo que los demás (Fig. 2d). De acuerdo con esta separación, se encontraron siete morfoespecies con el primer patrón (2, 3, 5, 6, 10, 12, y 13), y dos morfoespecies con el segundo (4 y 11).

Por otro lado, el S2 presentó una especie y tres morfoespecies que también pueden separarse en dos subgrupos a partir de la morfología de los incisivos mandibulares; uno de los patrones con incisivos similares en tamaño (Fig. 2e), y otro con un prominente incisivo externo más largo que los demás (Fig. 2f); la especie *Camelobaetidius guaycara* se encontró con el primer patrón, mientras que con el segundo tres morfoespecies (7, 8 y 9). Además, para las ninfas de las especies *C. maidu*, *C. variabilis*, *C. kondratieffi* y *C. shepardii* se presentan mediante ilustraciones los rasgos morfológicos más importantes del material revisado tales como labro, mandíbulas, hipofaringe, maxila, labio, espinas del IV tergo abdominal, uñas y coloración en el caso exclusivo de *C. shepardii* (anexos 3.1–3.10).

Respecto a la clave taxonómica, en esta se incluyeron características dicotómicas para distinguir tanto la especie como las 12 morfoespecies encontradas, por tanto esta herramienta se encuentra limitada como clave tentativa debido a que solamente presenta una especie segura, mientras que las demás morfoespecies deberán ser descritas de manera más amplia para establecer una clave definitiva. Además, tanto para *C. guaycara* como para todas las 12 morfoespecies se elaboraron láminas con fotografías de microscopio y

estereoscopio, donde se mostraron las características diagnósticas coloración de las ninfas (hembra y macho), mandíbula izquierda, palpo labial y espinas del tergo abdominal (Figs. 3–15).

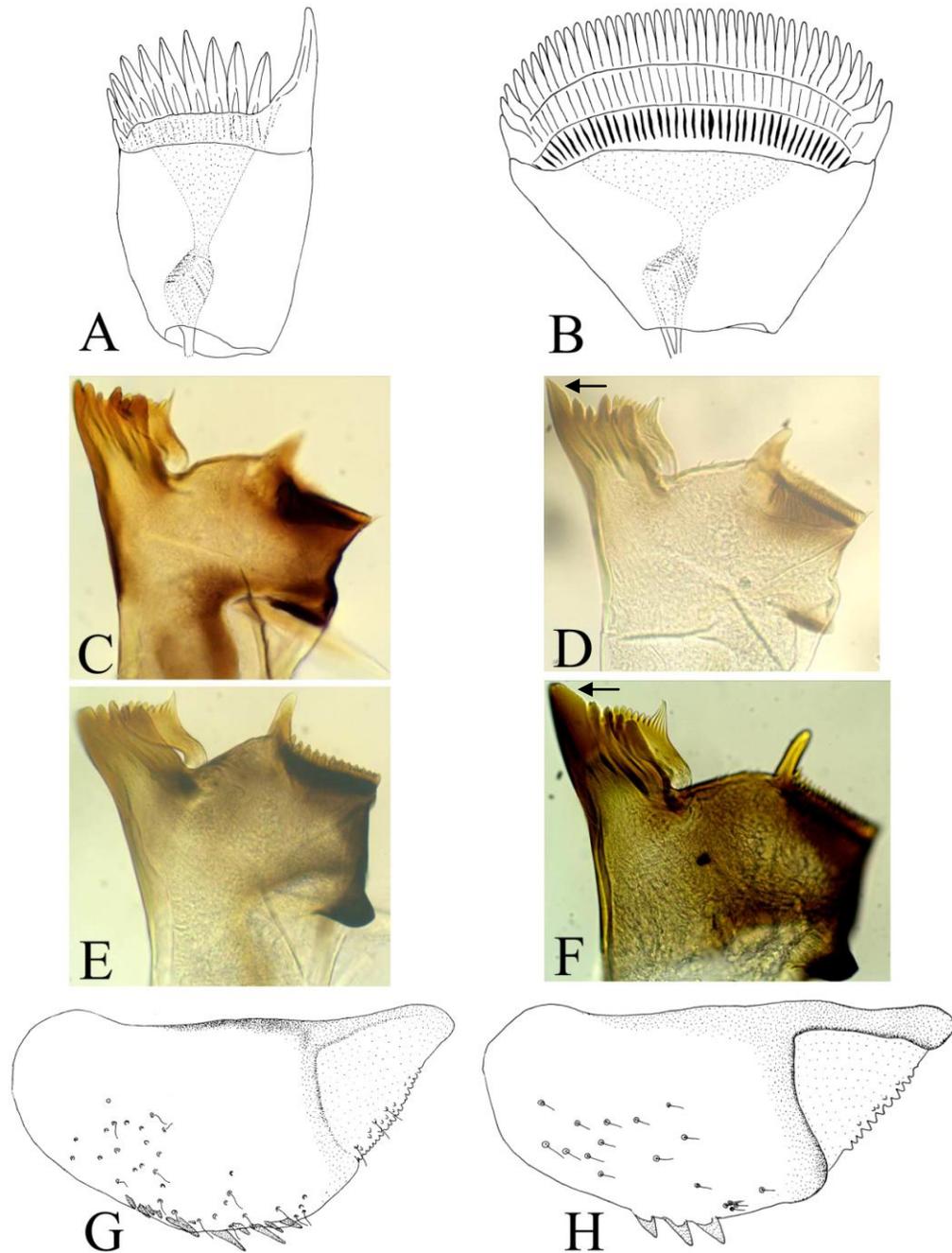


Figura 2. Uñas a) subgrupo 1, b) subgrupo 2; mandíbulas subgrupo 1, c) con incisivos similares en tamaño, d) con incisivo externo más largo que los demás; mandíbulas subgrupo 2, e) con incisivos similares en tamaño, f) con incisivo externo más largo que los demás; paraproctos g) subgrupo 1, h) subgrupo 2.

Fuente: Elaboración propia

4.2 Clave tentativa para distinguir las ninfas de las morfoespecies de *Camelobaetidius* encontradas en el presente estudio

1. Uñas tarsales con **11** o menos dentículos; mandíbulas con **7** incisivos; branquias **III** y **IV** del mismo tamaño; paraproctos con setas en el borde posterior (Fig. 2g).....5 (S1)
- 1'. Uñas tarsales con **24** o más dentículos; mandíbulas con **6** incisivos; branquia **III** 1.5x más grande que la branquia **IV**; paraproctos sin setas en el borde posterior (Fig. 2h).....2 (S2)
2. (1'). Ambas mandíbulas con el primer incisivo exterior tan largo como los demás; segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial triangular, borde del cuarto tergo abdominal con espinas redondeadas, coloración como en Fig. 3, tamaño 4.5–5.5 mm (de la cabeza al segmento abdominal X, misma medida en todos los casos), ambas vertientes, elevaciones bajas (45–596 msnm).....*Camelobaetidius guaycara* (morfoespecie 1)
- 2'. Ambas mandíbulas con primer incisivo exterior más largo que los demás; segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial redondeada; borde del tergo abdominal IV con espinas triangulares o redondeadas.....3
3. (2'). Borde del IV tergo abdominal con espinas redondeadas, segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial cortamente redondeada, coloración como en Fig. 4, tamaño 5–6 mm, vertiente caribe, elevaciones medias (880–973 msnm).....**morfoespecie 8**
- 3'. Borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares y proyección distomedial largamente redondeada4
4. (3'). Espinas del IV tergo abdominal triangulares bien desarrolladas, coloración como en Fig. 5, tamaño 8–9 mm, ambas vertientes, elevaciones medias (720–1515 msnm).....**Morfoespecie 7**

- 4'. Espinas del IV tergo abdominal triangulares reducidas, coloración como en Fig. 6, tamaño 6–7 mm, vertiente pacífica, elevaciones medias (720–1366 msnm).....**Morfoespecie 9**
5. Ambas mandíbulas con primer incisivo exterior al menos dos veces más largo que los demás; segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial redondeada; borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares.....6
- 5'. Ambas mandíbulas con el primer incisivo exterior tan largo como los demás; segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial redondeada o triangular; borde del IV tergo abdominal con espinas redondeadas o triangulares.....7
6. (5). Borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares bien desarrolladas, coloración como en Fig. 7, tamaño 5–6.5 mm, ambas vertiente, elevaciones medias (720–1127 msnm).....**morfoespecie 11**
- 6'. Borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares reducidas, coloración como en Fig. 8, tamaño 4.5–5 mm, vertiente pacífica, elevaciones bajas (297 msnm).....**morfoespecie 4**
7. (5'). Borde del IV tergo abdominal con espinas redondeadas.....8
- 7'. Borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares.....9
8. (7). Segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial triangular, coloración como en Fig. 9, tamaño 4.5–5.5 mm, vertiente caribe, elevaciones medias (1361–1403 msnm).....**morfoespecie 10**
- 8'. Segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial redondeada, coloración como en Fig. 10, tamaño 4.5–5.5 mm, vertiente pacífica, elevaciones medias (1003 msnm).....**morfoespecie 13**
9. (7'). Segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial triangular, borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares reducidas, coloración como en Fig. 11, tamaño 5.2–6.2 mm, vertiente caribe, elevaciones bajas (45–596 msnm)..... **morfoespecie 3**

9'. Segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial redondeada.....	10
10. (9'). Abdomen con coloración uniforme sin manchas (Fig. 12), borde del cuarto tergo abdominal con espinas triangulares reducidas, tamaño 6–7 mm, ambas vertientes, elevaciones medias (906–1762 msnm).....	morfoespecie 12
10'. Abdomen con manchas claras y oscuras.....	11
11. (10'). Segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial agrandada desde su base, borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares bien desarrolladas, coloración como en Fig. 13, tamaño 5–6 mm, vertiente pacífica, elevaciones bajas (75 msnm).....	morfoespecie 5
11'. Segundo segmento del palpo labial con proyección distomedial agrandada apicalmente.....	12
12. (11'). Borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares reducidas, coloración como en Fig. 14, tamaño 4–5.5 mm, vertiente pacífica, elevaciones bajas (256 msnm).....	morfoespecie 2
12'. Borde del IV tergo abdominal con espinas triangulares bien desarrolladas, coloración como en Fig. 15, tamaño 3.5–4 mm, vertiente caribe, elevaciones bajas (40–183 msnm).....	morfoespecie 6

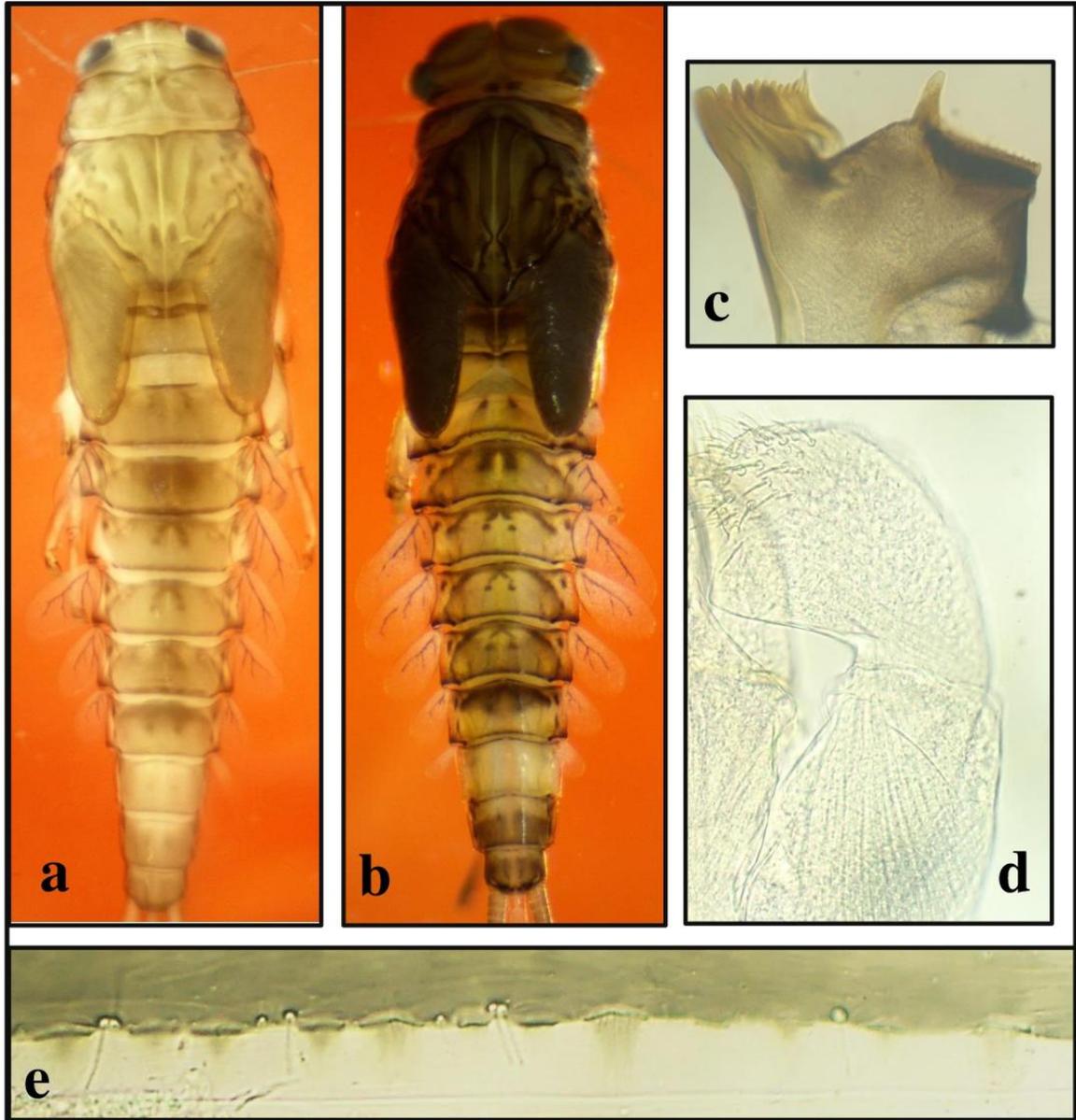


Figura 3. *Camelobaetidius guaycara* coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal

Fuente: Elaboración propia

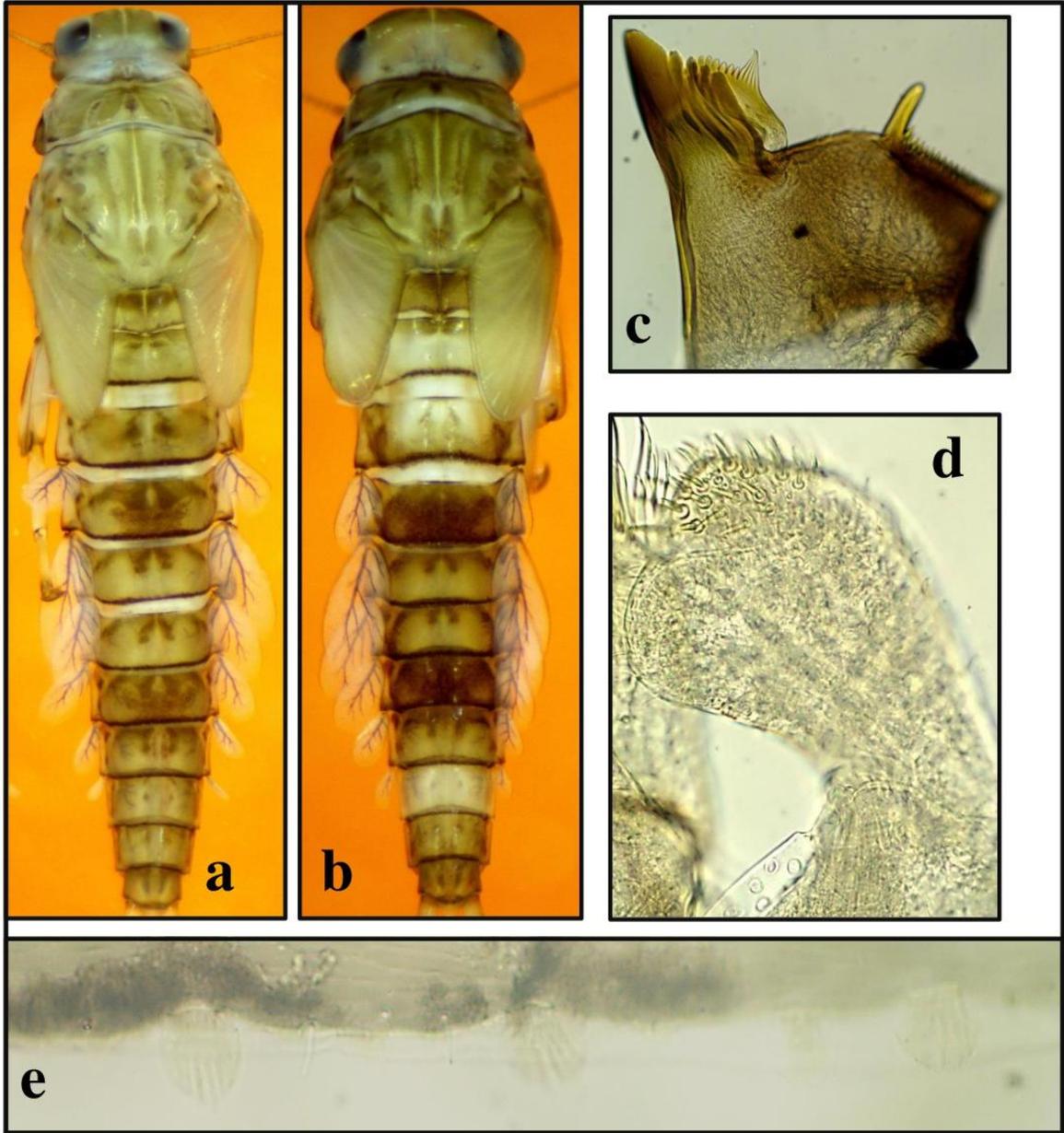


Figura 4. *Camelobaetidius sp. 8*. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

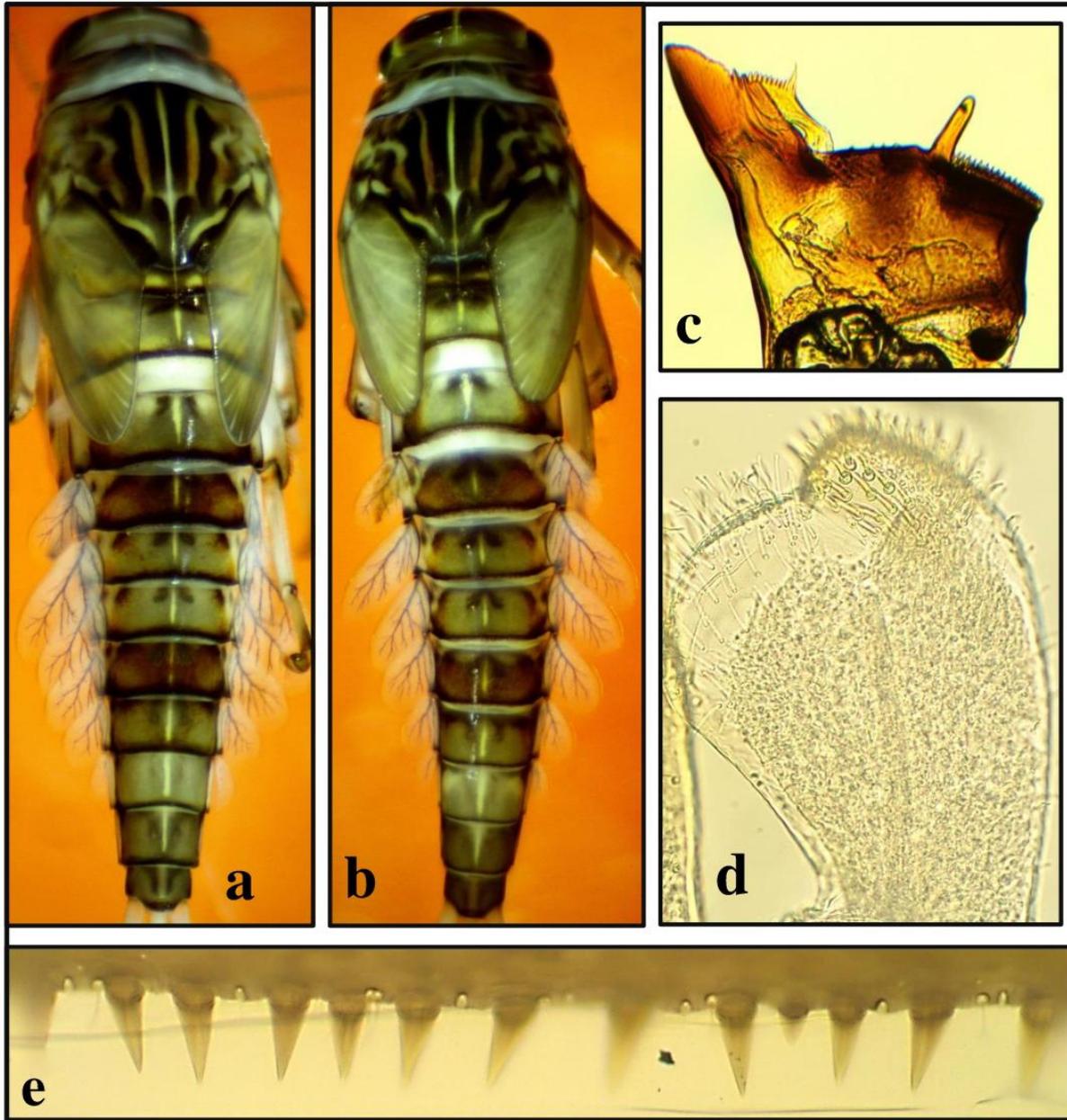


Figura 5. *Camelobaetidius* sp. 7. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

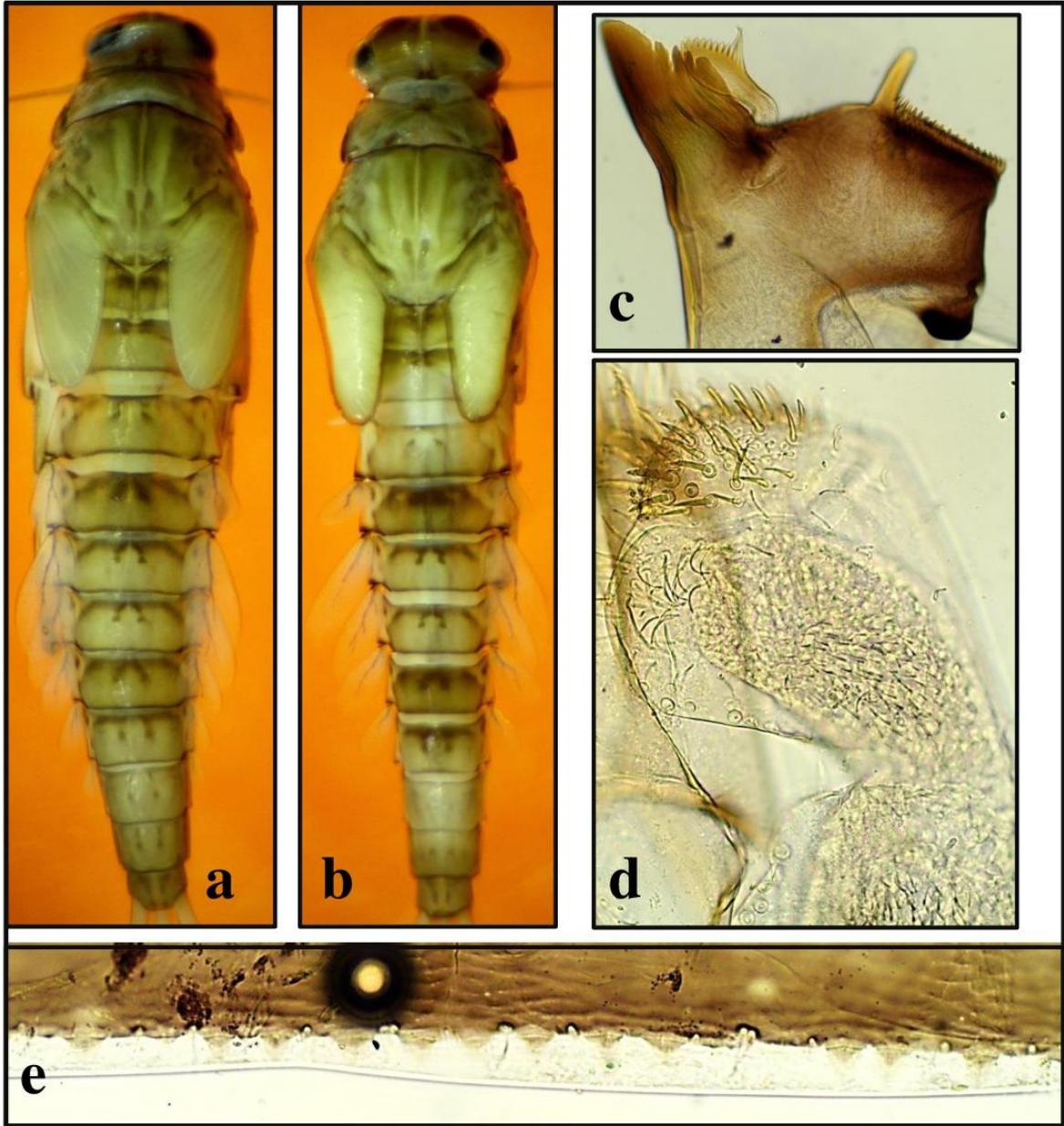


Figura 6. *Camelobaetidius* sp. 9. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

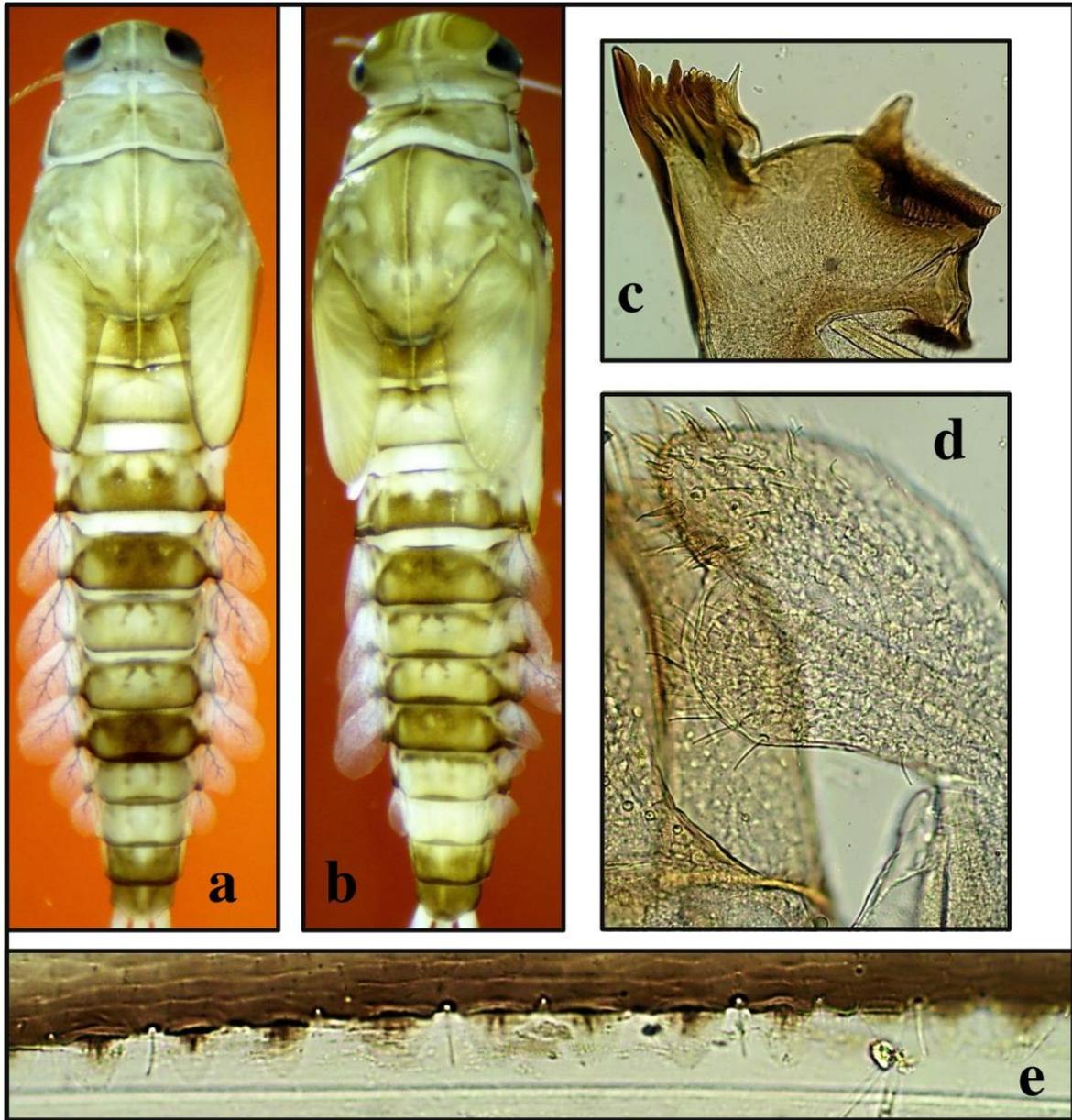


Figura 7. *Camelobaetidius sp.* 11. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

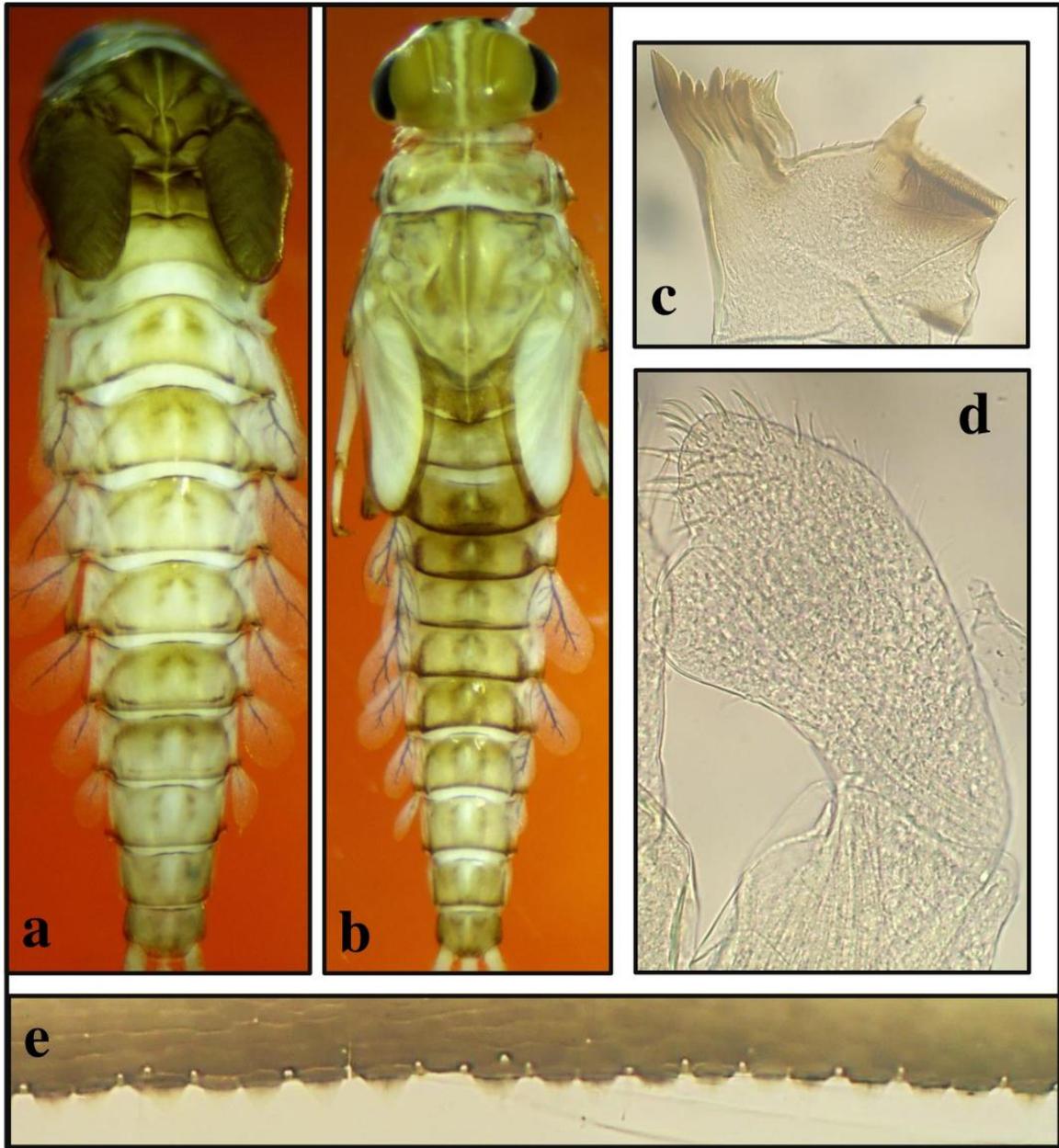


Figura 8. *Camelobaetidius* sp. 4. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

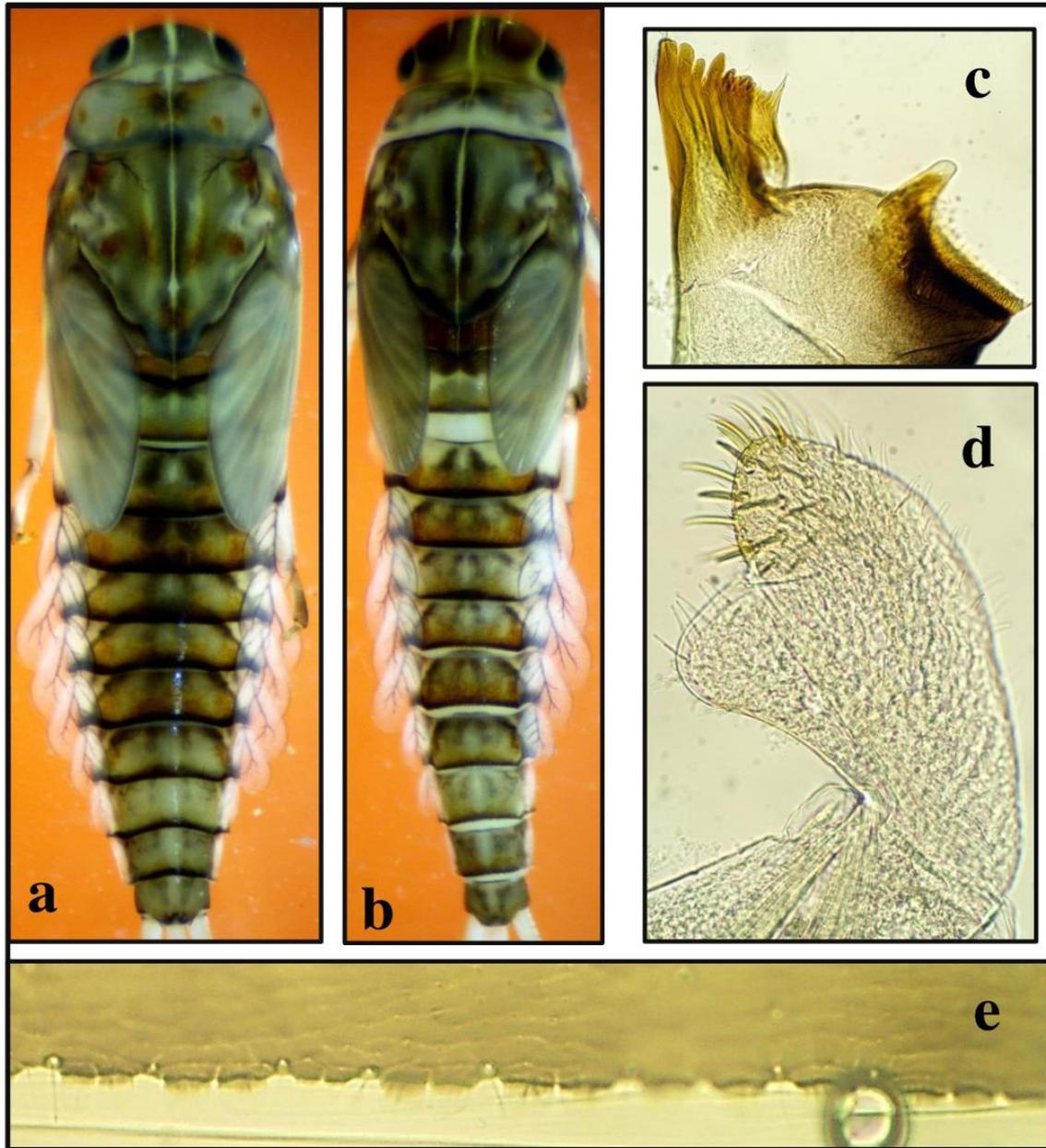


Figura 9. *Camelobaetidius* sp. 10. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

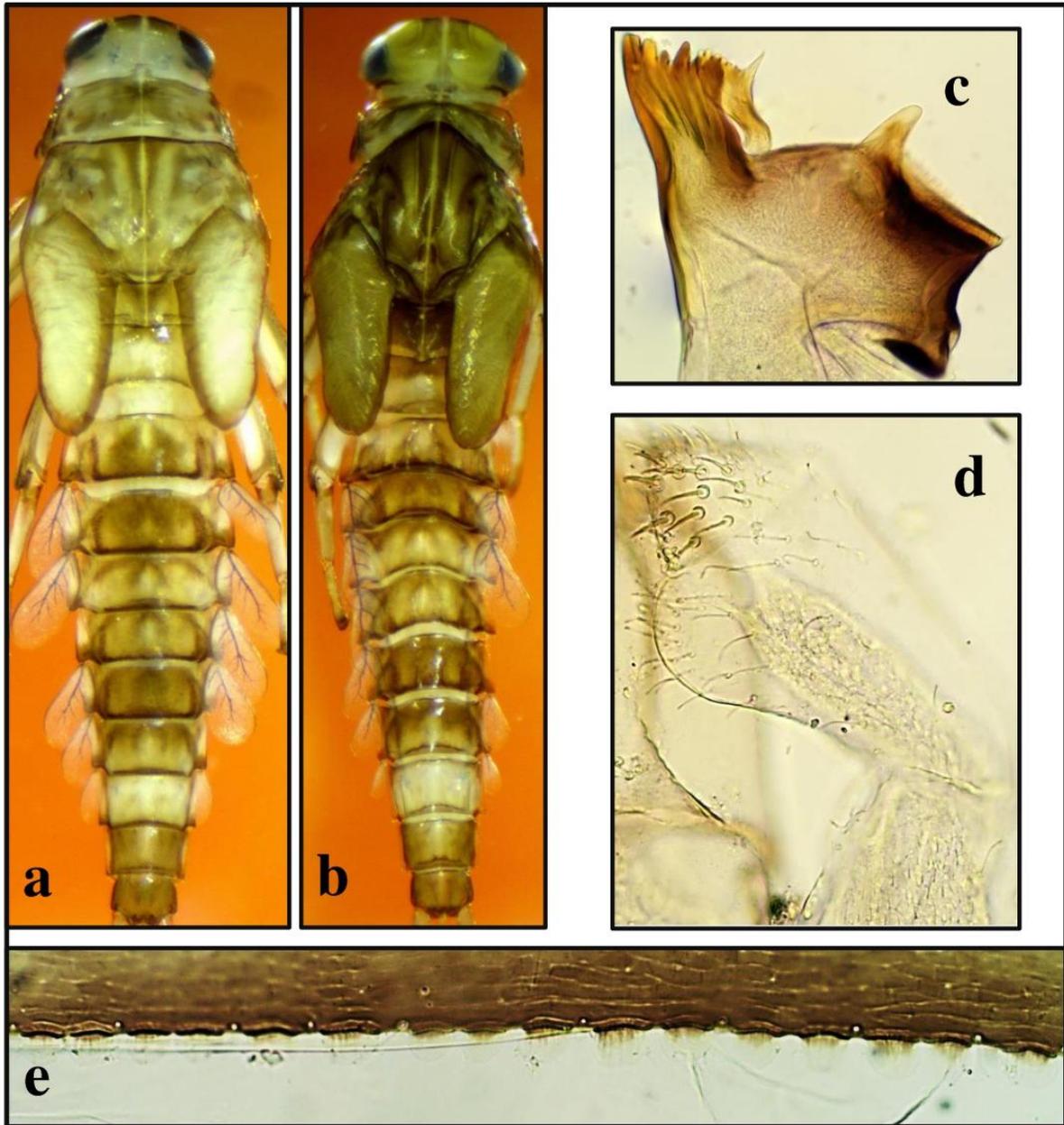


Figura 10. *Camelobaetidius sp.* 13. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

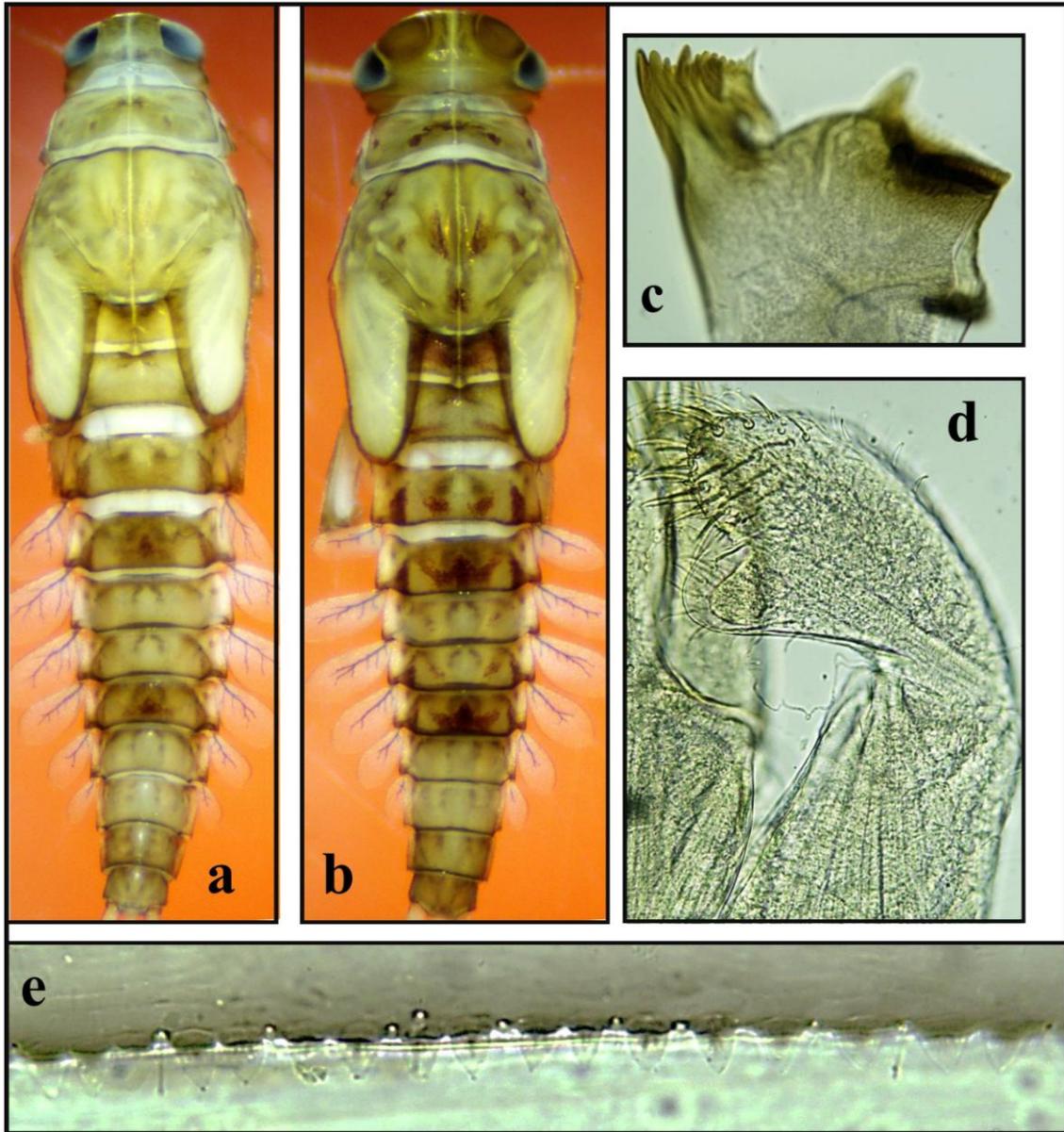


Figura 11. *Camelobaetidius* sp. 3. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

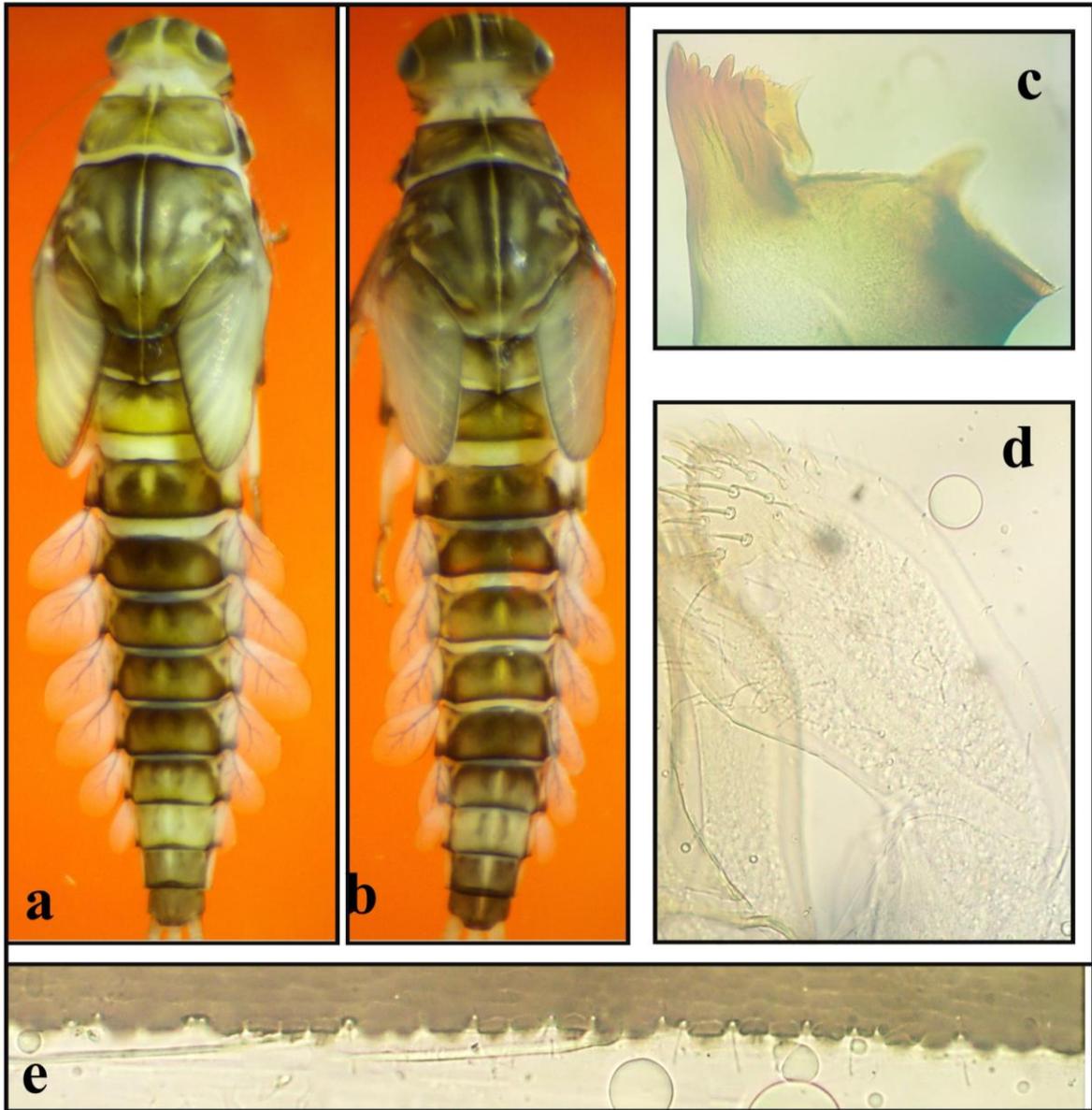


Figura 12. *Camelobaetidius sp. 12*. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

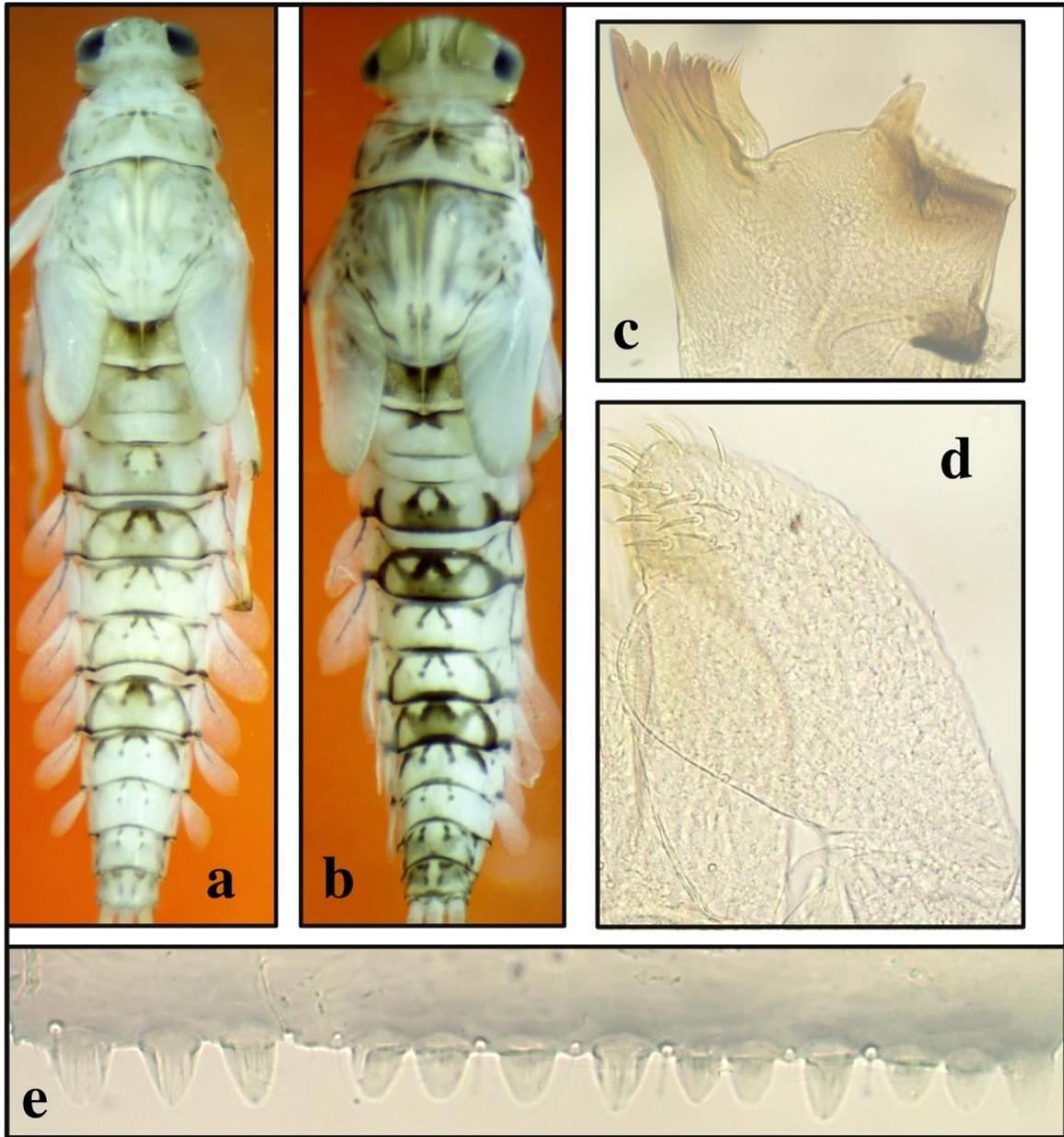


Figura 13. *Camelobaetidius sp. 5*. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

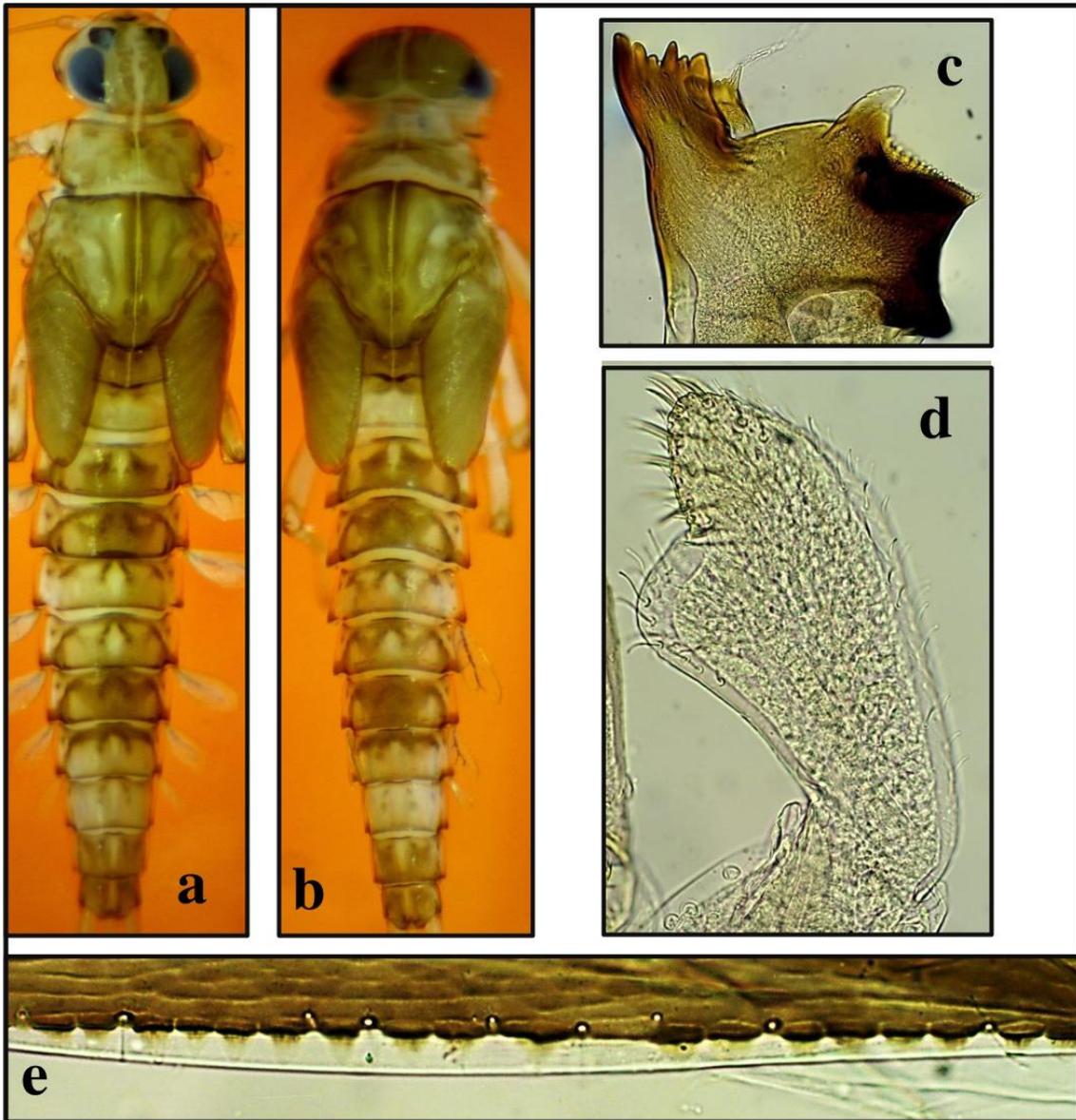


Figura 14. *Camelobaetidius sp. 2.* coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

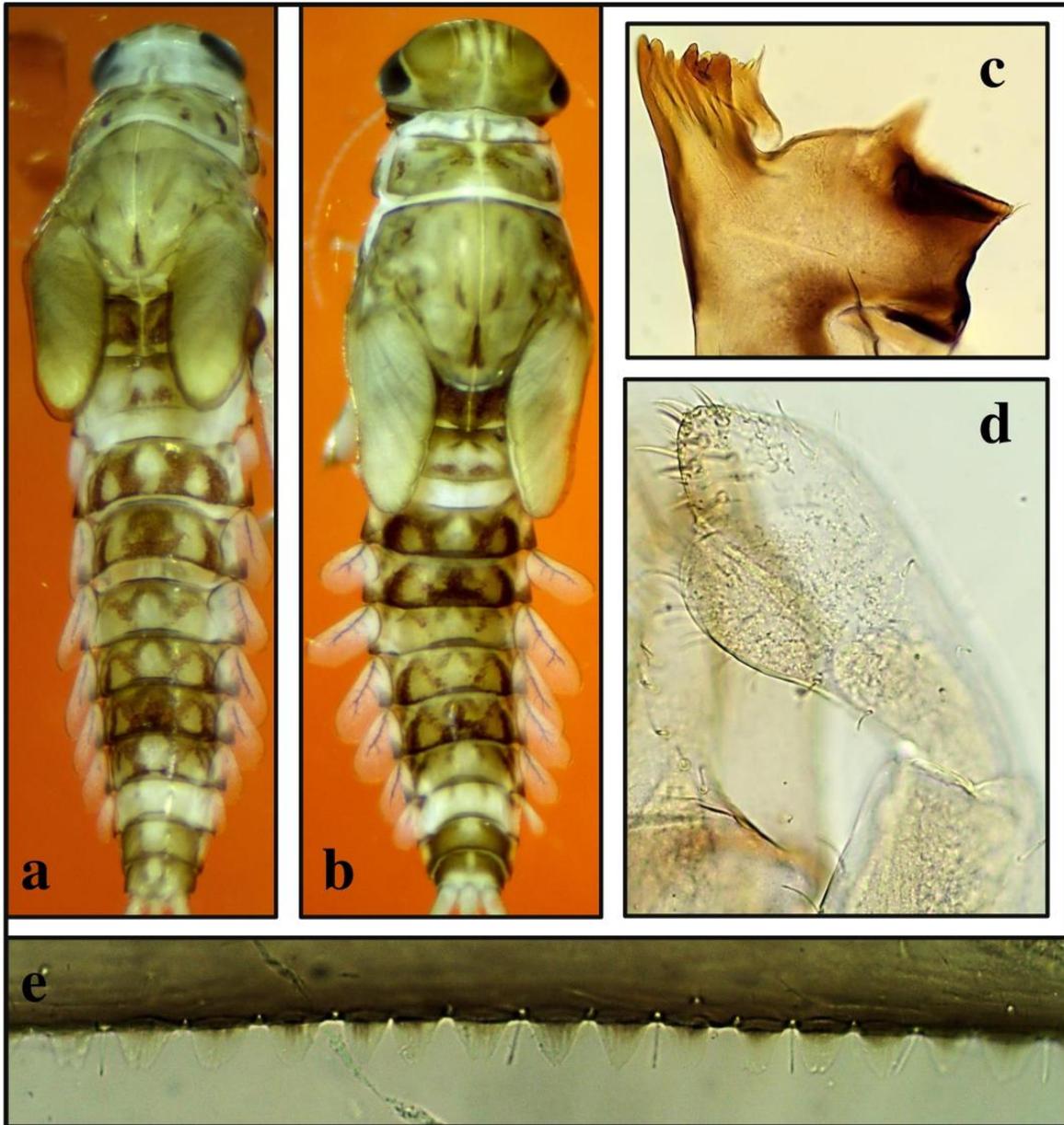


Figura 15. *Camelobaetidius sp. 6*. coloración a) hembra y b) macho, c) mandíbula izquierda, d) palpo labial, y e) espinas del cuarto tergo abdominal.

Fuente: Elaboración propia

4.3 Zonas de Influencia

Se digitalizaron un total de 35988 ha en las ZI de los 28 sitios de estudio, en las cuales dominaron las coberturas urbanas (continuas y discontinuas), agropecuarias (cultivos anuales y permanentes, pastos limpios y arbolados), y boscosas (bosque denso, de galería y secundario), y además se encontraron ZI con coberturas boscosas altamente fragmentadas en sitios como Quebrada Tortuga y los ríos Cañas, Jiménez, Peje, y Tibás (Cuadro 1). Respecto a la validación de estas coberturas, todas alcanzaron el 80% o más necesario para ser consideradas válidas (Anexo 4). En cuanto a las correlaciones, estas fueron significativas entre el orden del río y el área total de la zona de influencia ($r=0.79$), orden del río y fragmentos de cobertura boscosa ($r=0.72$), área de la zona de influencia y fragmentos de cobertura boscosa ($r=0.83$), porcentaje de cobertura boscosa y porcentaje de cobertura agropecuaria ($r=-0.86$), fragmentos de cobertura boscosa y porcentaje de cobertura agropecuaria ($r=0.39$), y porcentaje de cobertura boscosa y porcentaje de cobertura urbana ($r=-0.58$).

Cuadro 1. Coberturas de uso de la tierra en las Zonas de Influencia y morfoespecies presentes

Sitio	Área de influencia (ha)	% Cobertura agropecuaria	% Cobertura urbana	% Cobertura boscosa	Fragmentos de cobertura boscosa	Morfoespecie encontrada
Quebrada Tortuga	84	69	19	11	4	1, 3, 6
Río Peje	2003	65	10	24	49	6
Quebrada Borbón	189	65	3	32	4	9, 11
Río Jiménez	8408	56	7	35	113	1, 3, 6
Río Cañas	4371	56	3	36	183	2
Río San Rafael	464	50	16	33	11	3, 6
Río Tibás	2882	43	21	32	47	9, 12
Río Torito	424	42	0.71	36	6	7, 11

Sitio	Área de influencia (ha)	% Cobertura agropecuaria	% Cobertura urbana	% Cobertura boscosa	Fragmentos de cobertura boscosa	Morfoespecie encontrada
Quebrada Segunda	40	38	0	62	2	8
Río Aquiares	613	36	0	32	7	7, 12
Río Bonilla	1705	31	0.87	48	27	1
Quebrada Tambor	39	31	0	69	2	9
Quebrada Seca	990	30	60	7	54	12
Río Colima	240	30	0	43	7	7, 11
Río Porrosatí	210	23	1.9	56	6	12
Río Ciruelas	817	20	3	45	15	9, 12
Río Claro	2305	16	0.04	59	45	1, 5
Río Chirripó	5119	15	1.35	55	79	7, 13
Quebrada Playa Hermosa	117	13	1	84	4	1
Río Atirro	1942	13	0.53	83	14	1, 3
Río Guacimal	889	12	9	75	17	7, 9, 11
Río San Luis	467	11	1.54	85	9	7, 9, 11
Quebrada Poza Azul	66	8	4	88	3	1
Río Ángel	1375	5	0.12	79	9	7, 8, 11
Río Sombrero	545	0,92	0	95	2	10
Quebrada Manigordo	52	0,82	0	74	3	1, 5

Sitio	Área de influencia (ha)	% Cobertura agropecuaria	% Cobertura urbana	% Cobertura boscosa	Fragmentos de cobertura boscosa	Morfoespecie encontrada
Río Blanco	202	0	0	100	1	4
Quebrada Negra	60	0	0	100	1	4
Media	1307.8	29.9	7.8	56.3	25.8	–
Máximo	8408	69	60	100	183	3
Mínimo	39	0	0	7	1	1
Desviación estándar	1907.6	20.9	13.9	26.9	40.9	–

Fuente: Elaboración propia

4.4 Vulnerabilidad a la contaminación y tolerancia de *Camelobaetidius*

Se definieron con vulnerabilidad alta a la contaminación ocho ZI (Borbón, Seca, Tortuga, Cañas, Jiménez, Peje, San Rafael, y Tibás); 16 ZI con vulnerabilidad media (Bonilla, Tambor, Ángel, Quijano, Atirro, Chirripó, Ciruelas, Claro, Colima, Guacimal, Playa Hermosa, Porrosatí, Poza Azul, San Luis, Segunda, y Torito); y cuatro ZI con vulnerabilidad baja (Negra, Blanco, Sombrero, y Manigordo) (Anexos 5.1–5.28). Según esta clasificación, se determinaron *C. guaycara* y seis morfoespecies como “muy tolerantes” presentes en sitios de ZI con vulnerabilidad alta, media y baja, cuatro morfoespecies “algo tolerantes” exclusivamente en sitios con ZI con vulnerabilidad media, y dos morfoespecies “poco tolerantes” exclusivamente en sitios con ZI con vulnerabilidad baja (Cuadro 2).

Cuadro 2. Morfoespecies presentes según la vulnerabilidad a la contaminación en las Zonas de Influencia.

Zona de Influencia	Quebradas y Ríos	Vulnerabilidad a contaminación	Morfoespecies
Áreas urbanas y agropecuarias entre 59–90% (áreas boscosas de 7–36%)	Borbón, Seca, Tortuga, Cañas, Jiménez, Peje, San Rafael, Tibás	Alta	1 (<i>C. guaycara</i>), 2, 3, 6, 9, 11, 12
Áreas urbanas y agropecuarias entre 5–58% (áreas boscosas de 36–88%)	Bonilla, Tambor, Ángel, Aquiares, Atirro, Chirripó, Ciruelas, Claro, Colima, Guacimal, Playa Hermosa, Porrosatí, Poza Azul, San Luis, Segunda, Torito	Media	1 (<i>C. guaycara</i>), 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13
Áreas urbanas y agropecuarias entre 0–4% (áreas boscosas de 74–100%)	Negra, Blanco, Sombrero, Manigordo	Baja	1 (<i>C. guaycara</i>), 4, 5, 10

Fuente: Elaboración propia

4.5 Distribución según vertientes y rango altitudinal

En cuanto a los análisis PERMANOVA, se encontraron relaciones significativas entre las morfoespecies y su presencia de acuerdo con la vertiente ($F= 1.8906$, $p<0.10$, $gl=1$) y la elevación ($F= 9.3545$, $p<0.05$, $gl= 1$), con las morfoespecies 3, 6, 8, 10 distribuidas solamente en la vertiente Caribe; las morfoespecies 2, 4, 5, 9 y 13 únicamente en la vertiente Pacífica, y las morfoespecies 1 (*C. guaycara*), 7, 11, y 12 en ambas vertientes; entre estas, algunas se encontraron exclusivamente en uno o dos ríos de una sola cuenca hidrográfica (morfoespecies 2, 4, 5, 10, 13, Cuadro 1). Asimismo, se encontró un patrón de distribución altitudinal en el cual *C. guaycara* (morfoespecie 1) y cinco morfoespecies están exclusivamente en elevaciones por debajo de los 600 msnm, y siete solamente en elevaciones sobre 700 msnm (Fig. 16), con menor cantidad de morfoespecies en el límite superior del rango de distribución de ambos grupos altitudinales, así como un rango de distribución más amplio para las morfoespecies de elevaciones medias (Fig. 17.).

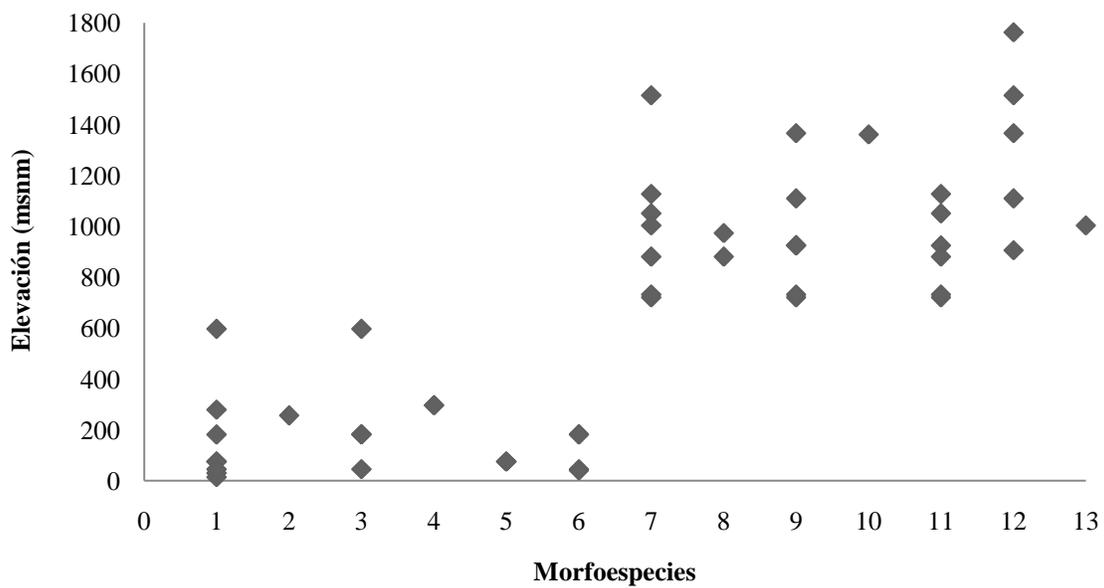


Figura 16. Distribución altitudinal de las morfoespecies encontradas en los sitios de muestreo.

Fuente: Elaboración propia

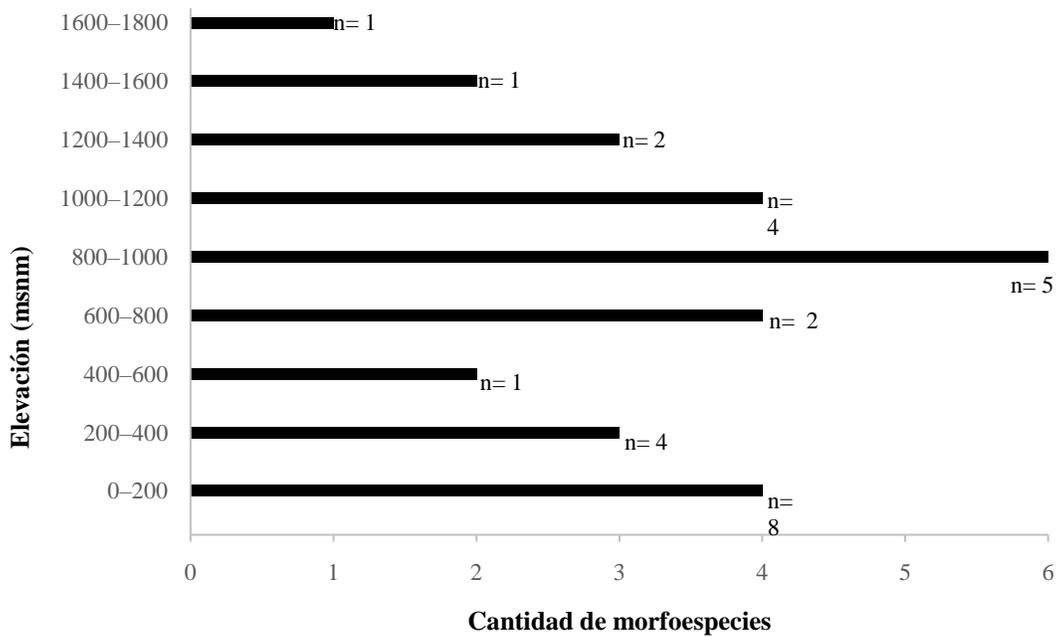


Figura 17. Cantidad de morfoespecies registradas cada 200 metros en el gradiente altitudinal del material revisado, con "n" como cantidad de sitios de muestreo.

Fuente: Elaboración propia

5. Capítulo V: Discusión

5.1 Revisión taxonómica

En cuanto a la diversidad de *Camelobaetidius* en Costa Rica, la identificación de una especie y 12 morfoespecies sugiere que los registros de la literatura pueden estar subestimados en toda América Central, con apenas ocho especies reportadas para la región (Allen & Cohen, 1977; Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995; Lugo-Ortiz & McCafferty, 1996; Wiersema & Baumgardner, 2000; McCafferty *et al.*, 2004; Meyer *et al.*, 2008; McCafferty, 2011a; McCafferty, 2011b; De Jong & Canton, 2015, Sibaja-Araya & Esquivel, 2018). Otros esfuerzos taxonómicos con este género han sido llevados a cabo en países sudamericanos como Argentina y Brasil, donde se ha reportado la presencia de entre 7 y 24 especies (Nieto 2003, Salles *et al.*, 2016). Además, es importante resaltar que en el país la familia Baetidae reporta 15 géneros (Flowers & De la Rosa, 2010) y en ningún otro caso se ha realizado una revisión taxonómica, por lo cual su diversidad puede también estar subestimada.

La diversidad encontrada de este género puede compararse con otros tales como *Baetodes* (Baetidae) y *Thraulodes* (Leptophlebiidae), que cuentan respectivamente con 12 y 18 especies en América Central (Flowers & De la Rosa, 2010); y con otros órdenes acuáticos como Odonata, con géneros como *Macrothemis* (Libellulidae), *Micrathyria* (Libellulidae), y *Argia* (Coenagrionidae) que registran en CR respectivamente 12, 13 y 23 especies (Esquivel, 2006). No obstante, la diversidad de Ephemeroptera es baja en comparación con los insectos terrestres, que presentan géneros con alta diversidad en CR, tales como hormigas del género *Crematogaster* (Formicidae) con 31 especies (Longino, 2003), y abejas de las orquídeas del género *Euglossa* (Apidae) con 39 especies (Roubik & Hanson, 2004).

De acuerdo con el análisis taxonómico, se encontró que *C. guaycara* presenta relación morfológica con especies sudamericanas como *C. edmundsi*, registrada en Colombia y Venezuela, la cual comparte características como proyección distomedial triangular y espinas redondeadas en el IV tergo abdominal (Dominique *et al.*, 2001; Cruz, *et al.*, 2012; Sibaja-Araya & Esquivel, 2018). En cuanto a las demás morfoespecies

analizadas, estas presentan una proyección distomedial nunca triangular, tercer segmento del palpo labial bien desarrollado, espinas en el IV tergo abdominal generalmente triangulares, y filamento central bien desarrollado, al igual que otras especies encontradas en América Central y del Norte, según el material revisado de *C. maidu*, *C. variabilis*, *C. kondratieffi* y *C. shepardii* (Anexos 3.1–3.10; Sibaja-Araya & Esquivel, 2020) y las descripciones originales de las especies presentes en dichas regiones (Traver & Edmunds, 1968; Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995; Wiersema, 1998; Randolph & McCafferty, 2001; Jacobus & McCafferty, 2005; Boldrini & Pes, 2014).

Respecto a las demás especies registradas para América Central, se encontró que la morfoespecie 12 presenta una proyección distomedial redondeada, y mandíbulas con incisivos similares en longitud, al igual que *C. warreni* (S1) (Traver & Edmunds, 1968), sin embargo dicha morfoespecie puede distinguirse por la ausencia de setas junto al arco anterodorsal del labro, y palpo maxilar con segmento III apicalmente curvo; por tanto, es necesaria la revisión del material tipo de *C. warreni* para confirmar su presencia entre las morfoespecies identificadas. Por su parte, no se encontraron las especies *C. kondratieffi* (S2) y *C. musseri* (S2), las cuales presentan, respectivamente una proyección distomedial subrectangular y truncada (Traver & Edmunds, 1968; Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995; Anexo 3.6) ausentes en las morfoespecies determinadas, por lo que se plantea que el material registrado para Costa Rica podría haber sido erróneamente identificado en ambos casos.

Además, no se encontraron morfoespecies con las características diagnósticas de las especies *C. mexicanus* (S1) y *C. variabilis* (S1), cuya distribución más al sur se da respectivamente en Nicaragua y Guatemala (McCafferty *et al.*, 2004; Meyer *et al.*, 2008), las cuales se distinguen principalmente por la presencia de una proyección distomedial elongada en el caso de *C. mexicanus*, y en el caso de *C. variabilis* una proyección distomedial redondeada con espinas también redondeadas en el IV tergo abdominal (Wiersema, 1998; Boldrini & Pes, 2014; Anexos 3.3, 3.4). Asimismo, tampoco se encontraron en conjunto las características proyección distomedial cortamente redondeada y espinas triangulares en el IV tergo abdominal, que distinguen a *C. shepardii* (S2), por lo

cual se mantiene su distribución más al sur en Nicaragua (Randolph & McCafferty, 2001; Meyer *et al.*, 2008; Anexos 3.7–3.10).

5.2 Zonas de Influencia y vulnerabilidad a la contaminación

Las correlaciones positivas encontradas entre el orden del río con el área total de la ZI y los fragmentos de cobertura boscosa muestran una relación esperada, donde quebradas o ríos con mayor red hídrica tienen ZI de mayor área así como más porcentaje de las diferentes coberturas. Además, se encontró una correlación positiva entre los fragmentos boscosos y las coberturas agropecuarias, la cual se da en forma generalizada en quebradas y ríos de la GAM y zonas rurales, y se agrava en estas últimas por las coberturas de cultivos extensivos como el de piña, que han reemplazado zonas naturales de bosque en años recientes, principalmente en las regiones Caribe y Huetar Norte (Laboratorio PRIAS, 2018); dicha degradación de las áreas boscosas se visualiza como una tendencia para Latinoamérica, tanto por cambios en los usos de la tierra como por variabilidad climática, especialmente en América Central donde se espera un aumento de las actividades agropecuarias (Davis & Lopez-Carr 2014; Boit *et al.*, 2016; Jadin *et al.*, 2016), por lo que las presiones sobre el recurso hídrico en general también aumentarán.

Por otro lado, las correlaciones negativas sugieren una amplia sustitución de las zonas boscosas por áreas urbanas y agropecuarias, cuya variabilidad puede apreciarse en las diferentes ZI analizadas (Anexos 5.1–5.28). Entre estas ZI, sitios clasificados con alta vulnerabilidad a la contaminación como Q. Seca y R. Tibás (Anexos 5. 2 y 5.10) pueden presentar una mala calidad del agua (Municipalidad de Belén & Universidad Nacional, 2013; Mena-Rivera *et al.*, 2017; Mena-Rivera *et al.*, 2018), al igual que los ríos Cañas y Jiménez (Anexos 5. 4, 5.7) donde se reportan metales pesados derivados de actividades mineras, y plaguicidas derivados de cultivos de banano y piña (Echeverría-Sáenz *et al.*, 2011; Rojas, 2018); mientras que sitios con vulnerabilidad media como los ríos Guacimal y San Luis (Anexos 5.6, 5.22) pueden presentar una calidad regular (Guevara-Mora & Bonilla-Traña, 2017), o susceptibilidad a la erosión y sedimentación como en los ríos Chirripó y Claro (Anexo 5. 19, 5.20) (Krishnaswamy *et al.*, 2001; Pérez-Rubio & Mende, 2018).

Por consiguiente, la definición de coberturas de la tierra como indicador de vulnerabilidad a la contaminación en quebradas y ríos, es una herramienta que permite identificar a macroescala patrones de deterioro del ambiente en los cuerpos de agua superficial, lo cual respalda su implementación en diferentes estrategias de gestión del recurso hídrico a nivel internacional (Li *et al.*, 2006; Widyastuti & Suprayogi, 2016; Behmel *et al.*, 2016; Stathatou *et al.*, 2016). Asimismo, dicho deterioro de las coberturas naturales involucra también las áreas de amortiguamiento establecidas mediante legislación nacional (Ley 7575, 1996; Reglamento 25721, 1997), que son inexistentes en algunos sectores de la mayoría de las ZI, al estar ocupadas comúnmente por cultivos, pasturas, y urbanizaciones, por lo que se da un incumplimiento de la ley tanto en zonas urbanas como rurales.

5.3 Vulnerabilidad a la contaminación y tolerancia en *Camelobaetidius*

Se encontró que la diversidad de *Camelobaetidius* puede dividirse en tres diferentes condiciones de vulnerabilidad a la contaminación, lo que puede explicar su tolerancia a variadas condiciones ambientales (Municipalidad de Curridabat, 2015; Ríos *et al.*, 2015; Rúa *et al.*, 2015; Aguirre, 2017; García-Alzate *et al.*, 2017; Firmiano *et al.*, 2017; Villada-Bedoya *et al.*, 2017; Pillasagua, 2018; Ramírez *et al.*, 2018). Por tanto, estos organismos ahora categorizados por su tolerancia pueden aprovecharse como indicadores, lo cual es una característica que puede o no encontrarse en diferentes grupos de insectos (Sommaggio & Burgio, 2014; Bharti *et al.*, 2016; Watts *et al.*, 2017); en este sentido, al menos dos morfoespecies (4 y 10) se consideraron como “poco tolerantes” y podrían utilizarse de manera análoga a las familias de macroinvertebrados con mayor puntaje en el BMWP-CR (Decreto 33903-MINAE-S, 2007).

Entre las demás morfoespecies, resalta la presencia de 9 y 12 en quebradas y ríos de la GAM donde los cuerpos de agua superficial presentan niveles severos de deterioro en la calidad del agua como en Quebrada Seca y Río Tibás (Varela, 2007; Contraloría General de la República, 2013; Municipalidad de Belén & Universidad Nacional, 2013; Mena-Rivera *et al.*, 2017; Mena-Rivera *et al.*, 2018); por consiguiente, la supervivencia exclusiva de estas morfoespecies “muy tolerantes” puede ser un indicador de una mala calidad del agua para esta región del país. Además, otras morfoespecies consideradas “algo tolerantes” y

“muy tolerantes” como 7 y 11 respectivamente, no fueron encontradas en la GAM, aunque sus poblaciones se mantienen a lo largo de ambas vertientes, en ZI que presentan vulnerabilidad media a la contaminación y una mejor calidad del agua como en los ríos Guacimal y San Luis (Guevara-Mora & Bonilla-Traña, 2017), por lo que su presencia en la GAM o su periferia puede ser un indicador de mejores condiciones de calidad del agua.

Por su parte, *C. guaycara* y las morfoespecies 3 y 6 se encontraron en sitios de elevaciones bajas como los ríos Jiménez y Peje en la vertiente Caribe, la cual es una zona con cuerpos de agua superficial frecuentemente afectados por alta contaminación de plaguicidas derivados de la agricultura de cultivos extensivos como el arroz, el banano, y la piña (Castillo *et al.*, 2006; Echeverría-Sáenz *et al.*, 2012; Echeverría-Sáenz *et al.*, 2016). En este sentido, una futura ausencia de las poblaciones de estos organismos “muy tolerantes” en quebradas y ríos de la región, podría considerarse como un indicador de un mayor deterioro ambiental, producto de la actual tendencia de intensificación agrícola en el país (Jadin *et al.*, 2016; Laboratorio PRIAS, 2018).

Respecto a las morfoespecies 5, 8 y 13, estas se registraron en sitios con estados intermedios de vulnerabilidad como los ríos Claro y Chirripó, los cuales presentan presiones por cambios en las coberturas de uso de la tierra y por su susceptibilidad a la erosión y sedimentación (Krishnaswamy *et al.*, 2001; AyA, 2017; Pérez-Rubio & Mende, 2018); por consiguiente, la ausencia de estas morfoespecies “algo tolerantes” podría utilizarse como indicador de un eventual deterioro de la calidad del agua en estos sitios. Por último, solamente la morfoespecie 2 fue encontrada en el río Cañas, el cual se encuentra contaminado por metales pesados debido a su ubicación en la región minera de la vertiente pacífica de la cordillera de Tilarán (MINAE, 2014; Rojas, 2018), lo cual sugiere que la presencia exclusiva de esta morfoespecie “muy tolerante” puede usarse como indicador de cuerpos de agua superficial con alta vulnerabilidad; en contraste, especies de este género en Guyana Francesa pueden considerarse como indicadoras de quebradas y ríos libres de los efectos tanto de actividad minera reciente como de minas antiguamente abandonadas (Dedieu *et al.*, 2015).

5.4 Distribución según vertientes y rango altitudinal

La estrecha relación entre la distribución de las morfoespecies y las vertientes sugiere un importante aislamiento por barreras climáticas y geográficas, que se manifiesta en la diferenciación genética dentro de las poblaciones de insectos acuáticos en ambientes tropicales, lo cual se relaciona con la especiación alopátrica y la adaptación ecológica considerados como factores primarios en la diversificación de estos organismos (Dijkstra *et al.*, 2014; Polato *et al.*, 2018). Por tanto, esto puede ayudar a explicar la alta diversidad de la familia Baetidae, que presenta a nivel mundial la segunda mayor cantidad de géneros y especies, con más del 90% consideradas como endémicas en la región Neotropical (Barber-James *et al.*, 2008; Gattolliat & Nieto, 2009; Salles *et al.*, 2018).

Además, se detectó una relación significativa entre la presencia de las diferentes morfoespecies y el gradiente altitudinal de 14–1762 msnm, más bajo en comparación que el observado para *Camelobaetidius* en ecosistemas lóticos de Colombia, entre 289–2900 msnm (Gutiérrez & Reinoso-Flores, 2010; Gutiérrez & Dias, 2015). Por su parte, esta separación altitudinal encontrada se ha registrado tanto para otras especies de Ephemeroptera como para el orden Trichoptera en ríos tropicales de Ecuador, Nueva Guinea y Tailandia, lo cual puede asociarse a preferencias en la temperatura del agua (Malicky & Chantaramongkol, 1993; Shah *et al.*, 2017a; Cozzarolo *et al.*, 2019), y a la disponibilidad de alimento caracterizada en elevaciones bajas por material alóctono (hojarasca) y material autóctono (algas epilíticas) en elevaciones medias y altas (Atkinson *et al.*, 2018).

Por tanto, las preferencias altitudinales encontradas para ambos grupos de morfoespecies es un rasgo que puede vincularlas directamente con las condiciones climatológicas de elevaciones bajas y medias, lo que podría utilizarse como un fuerte predictor de respuestas evolutivas, alteraciones en los rangos de distribución, y cambios en sus funciones a nivel de comunidad a lo largo gradientes geográficos proyectados para variabilidad climática (Kearney & Porter, 2009; Shah *et al.*, 2017b; Pyne & Poff, 2017; Polato *et al.*, 2018). Por tanto, ambos grupos de morfoespecies podrían utilizarse también como indicadores de variabilidad climática mediante la proyección de modelos y el monitoreo de cambios en su rango de distribución altitudinal, especialmente para *C.*

guaycara y la morfoespecie 7 que son respectivamente las más comunes en elevaciones bajas y medias (Sibaja-Araya & Esquivel, 2018; Anexo 1.1).

6. Capítulo VI: Conclusiones

En primer lugar, resalta la alta diversidad encontrada de *Camelobaetidius* a pesar de las serias presiones de las actividades socioeconómicas sobre los ecosistemas lóticos del país, lo cual sugiere una importante resiliencia en estos cuerpos de agua superficial que mantienen todavía características favorables para algunos insectos acuáticos de amplia distribución geográfica.

Por otro lado, las morfoespecies encontradas muestran características diagnósticas que las relacionan tanto a las especies sudamericanas como a las de América Central y del Norte, lo cual destaca el papel biogeográfico de CR como puente para la dispersión de especies de insectos acuáticos del orden Ephemeroptera a través del continente americano.

Con respecto a la vulnerabilidad a la contaminación en los sitios de muestreo, se encontró que el análisis a macroescala de coberturas de uso de la tierra fue útil para la identificación de patrones de deterioro ambiental en quebradas y ríos de Costa Rica, los cuales se caracterizan por una amplia sustitución de las zonas boscosas naturales por coberturas agropecuarias y urbanas.

La clasificación de las morfoespecies analizadas en categorías de tolerancia permitió determinar su importancia como indicador para el monitoreo de acuerdo con diferentes regiones rurales y urbanas en el país, las cuales presentan problemáticas de deterioro de las aguas superficiales propias de su desarrollo socioeconómico.

Algunas de las quebradas y ríos con alta vulnerabilidad a la contaminación se caracterizaron por la presencia exclusiva de las morfoespecies 2, 6, 9, y 12; mientras que 5, 7, 8, y 13 se encontraron únicamente en cuerpos de agua con vulnerabilidad a la contaminación media; y 4 y 10 solamente en sitios con baja vulnerabilidad.

Por último, la relación entre la distribución de las morfoespecies respecto a las vertientes y el gradiente altitudinal, es un rasgo que puede ayudar a explicar la

diversificación de la familia Baetidae en el neotrópico y aplicarse como un indicador de variabilidad climática.

7. Recomendaciones

Se recomienda aprovechar ampliamente las posibilidades de bioindicación determinadas para *Camelobaetidius*, las cuales deben aplicarse junto con análisis fisicoquímicos complementarios para el manejo del recurso hídrico en distintas regiones del país, especialmente en las zonas densamente pobladas y de producción agropecuaria donde las quebradas y ríos son más vulnerables.

Es necesario investigar las condiciones fisicoquímicas de los sitios de recolecta analizados, como un aporte adicional que podría utilizarse para definir los rangos de tolerancia de calidad del agua en *C. guaycara* y las demás morfoespecies determinadas, y así precisar su valor como indicadores biológicos.

Se sugiere además la utilización de análisis espaciales de la cobertura de uso de la tierra en la elaboración de evaluaciones de deterioro ambiental de los ecosistemas lóticos, los cuales pueden adaptarse a diferentes escenarios según el área de estudio y aportar información valiosa sobre la salud de estos ecosistemas.

Asimismo, deben promoverse futuras investigaciones en sitios como los estudiados, con el fin de diagnosticar el potencial de diversidad de los diferentes grupos de macroinvertebrados bentónicos que todavía habitan ecosistemas alterados.

Finalmente, en cuanto a estrategias de educación ambiental sobre cuerpos de agua superficial de zonas urbanas y agropecuarias en Costa Rica, debe considerarse el hecho de que estos ecosistemas representan importantes reservorios para la biodiversidad, en los cuales sobreviven distintas poblaciones de insectos acuáticos como los encontrados en esta investigación.

8. Referencias bibliográficas

- Aguirre, J. M. (2017). Relación entre la composición y estructura de Macroinvertebrados acuáticos y la cobertura vegetal ribereña de cuatro tributarios del río Oglan Pastaza-Ecuador. Tesis pregrado, Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
- Alba-Tercedor, J. (1996). Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. In: IV Simposio del agua en Andalucía (SIAGA). Almería. pp. 203–213.
- Alba-Tercedor, J., & Sánchez-Ortega, A. (1988). Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hellawell (1978). *Limnetica*, 4, 51–56.
- Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 35, 257–284.
- Allen, R.K., & Cohen, S. D. (1977). Mayflies (Ephemeroptera) of Mexico and Central America: new species, descriptions, and records. *The Canadian Entomologist*, 109(3), 399–414.
- Alonso-Eguía, P., Mora, J. M., Campbell, B., & Springer, M. (Eds.). (2014). Diversidad, conservación y uso de los macroinvertebrados dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- Anderson, M.J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26: 32–46.
- Arana, V. (2016). *Water and Territory in Latin America. Trends, Challenges and Opportunities*. Brussels, Belgium: Springer International Publishing.
- Atkinson, C. L., Encalada, A. C., Rugenski, A. T., Thomas, S. A., Landeira-Dabarca, A., Poff, N. L., & Flecker, A. S. (2018). Determinants of food resource assimilation by stream insects along a tropical elevation gradient. *Oecologia*, 187(3), 731-744. (2017). Climate variability predicts thermal limits of aquatic insects across elevation and latitude. *Functional Ecology*, 31(11), 2118–2127.
- Auquilla, R. C., Astorga, Y., & Jiménez-Otárola, F. (2006). Influencia del uso del suelo en la calidad del agua en la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente (CATIE)*, 48, 81–92.
- Bailey, R. C., Norris, R. H., & Reynoldson, T. B. (2001). Taxonomic resolution of benthic macroinvertebrate communities in bioassessments. *Journal of the North American Benthological Society*, 20(2), 280–286.
- Bain, M. B., Harig, A. L., Loucks, D. P., Goforth, R. R., & Mills, K. E. (2000). Aquatic ecosystem protection and restoration: advances in methods for assessment and evaluation. *Environmental Science & Policy*, 3, 89–98.

- Baker, A. (2005). Land Use and Water Quality. En: Encyclopedia of Hydrological Sciences. Editores Anderson, M. G. & McDonnell, J. J. Editorial John Wiley & Sons, Ltd. EUA.
- Barber-James, H. M., Gattoliat, J. L., Sartori, M., & Hubbard, M. D. (2008). Global diversity of mayflies (Ephemeroptera, Insecta) in freshwater. *Hydrobiologia*, 595(1), 339–350.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D., & Stribling, J. B. (1999). Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers. USEPA, Washington.
- Barman, B., & Gupta, S. (2015). Aquatic insects as bio-indicator of water quality-A study on Bakuamari stream, Chakrashila Wildlife Sanctuary, Assam, North East India. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 3(3), 178–186.
- Behmel, S., Damour, M., Ludwig, R., & Rodriguez, M. J. (2016). Water quality monitoring strategies-A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 571, 1312–1329.
- Bertaso, T., Spies, M. R., Kotzian, C. B., & Flores, M. L. (2015). Effects of forest conversion on the assemblages structure of aquatic insects in subtropical regions. *Revista Brasileira de Entomologia*, 59(1), 43–49.
- Bharti, H., Bharti, M., & Pfeiffer, M. (2016). Ants as bioindicators of ecosystem health in Shivalik Mountains of Himalayas: assessment of species diversity and invasive species. *Asian myrmecology*, 8(1), 65–79.
- Boldrini, R., & Pes, A.M.O. (2014). Five new species of *Camelobaetidius* Demoulin, 1966 (Ephemeroptera: Baetidae), and redescription of *Camelobaetidius mexicanus* (Traver & Edmunds, 1968). *Zootaxa*, 3796(3), 545–567.
- Boit, A., Sakschewski, B., Boysen, L., Cano-Crespo, A., Clement, J., Garcia-Alaniz, N., Kok, K., Kolb, M., Langerwisch, F., Rammig, A., Sachse, R., Van Eupen, M., Von Bloh, W., Zemp, D., & Thonicke, K. (2016). Large-scale impact of climate change vs. land-use change on future biome shifts in Latin America. *Global Change Biology*, 22(11), 3689–3701.
- Braun, B. M., Pires, M. M., Kotzian, C. B., & Spies, M. R. (2014). Diversity and ecological aspects of aquatic insect communities from montane streams in southern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 26(2), 186–198.
- Buss, D. F., Carlisle, D. M., Chon, T. S., Culp, J., Harding, J. S., Keizer-Vlek, H. E., Robinson, W., Stracham, S., Thirion, C., & Hughes, R. M. (2015). Stream biomonitoring using macroinvertebrates around the globe: a comparison of large-scale programs. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 2–21.

- Buss, D. F., & Salles, F. F. (2007). Using Baetidae species as biological indicators of environmental degradation in a Brazilian river basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 130(1–3), 365–372.
- Buss, D. F., & Vitorino, A. S. (2010). Rapid bioassessment protocols using benthic macroinvertebrates in Brazil: evaluation of taxonomic sufficiency. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(2), 562–571.
- Castillo, L. E., Martínez, E., Ruepert, C., Savage, C., Gilek, M., Pinnock, M., & Solis, E. (2006). Water quality and macroinvertebrate community response following pesticide applications in a banana plantation, Limon, Costa Rica. *Science of the Total Environment*, 367(1), 418–432.
- Carrie, R., Dobson, M., & Barlow, J. (2017). Challenges using extrapolated family-level macroinvertebrate metrics in moderately disturbed tropical streams: a case-study from Belize. *Hydrobiologia*, 794(1), 257–271.
- Carter, J. L., Resh, V. H., & Hannaford, M. J. (2017). Macroinvertebrates as biotic indicators of environmental quality. In *Methods in stream ecology* (pp. 293-318). Academic Press.
- Charpentier, C. & Tabash, F. (1988). Variaciones en la Diversidad de la Comunidad Bentónica del Sedimento. Un Indicador Biológico del Estado de Contaminación de los Ríos de la Subregión de Heredia, Costa Rica. *Uniciencia*, 5(1–2), 69–76.
- Chuvieco, E. (2010.). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ed. Ariel, España. pp. 497.
- Cooper, C. M. (1993). Biological effects of agriculturally derived surface water pollutants on aquatic systems-a review. *Journal of Environmental Quality*, 22(3), 402–408.
- Contraloría General de la República (2013). Informe acerca de la Eficacia del Estado para Garantizar la Calidad del Agua en sus Diferentes Usos. Informe Nro. DFOE-AE-IF-01-2013.
- Cozzarolo, C. S., Balke, M., Buerki, S., Arrigo, N., Pitteloud, C., Gueuning, M., Salamin, N., Sartori, M. & Alvarez, N. (2019). Biogeography and ecological diversification of a mayfly clade in New Guinea. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 1–15.
- Craig, S. 1992. Biological indicators of pollution in the upper section of the Rio Segundo, Costa Rica. ACM Tropical Field Research Final Report. San Jose, Costa Rica. 54 p.
- Cruz, P. V., Boldrini, R., Quinto, C. F., & Frontado, H. (2012). New Baetidae (Insecta: Ephemeroptera) records from Venezuela and nymph description of an unnamed Fallceon species. *International Journal of Zoology*. 1–6.

- Daufresne, M., Bady, P., & Fruget, J. F. (2007). Impacts of global changes and extreme hydroclimatic events on macroinvertebrate community structures in the French Rhône River. *Oecologia*, 151(3), 544–559.
- Davis, J., & Lopez-Carr, D. (2014). Migration, remittances and smallholder decision-making: Implications for land use and livelihood change in Central America. *Land Use Policy*, 36, 319–329.
- Davies, P. E., & Nelson, M. (1994). Relationships between riparian buffer widths and the effects of logging on stream habitat, invertebrate community composition and fish abundance. *Marine and Freshwater Research*, 45(7), 1289–1305.
- Decreto 33903-MINAE-S (2007). Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. La Gaceta nº 178. Poder Ejecutivo, Costa Rica.
- Dedieu, N., Rhone, M., Vigouroux, R., & Céréghino, R. (2015). Assessing the impact of gold mining in headwater streams of Eastern Amazonia using Ephemeroptera assemblages and biological traits. *Ecological Indicators*, 52, 332–340.
- De Jong, G.D. & Canton, S.P. (2015). Mayflies (Insecta: Ephemeroptera) in Chiriquí Province, Republic of Panama, with a new distributional record for *Camelobaetidius kondratieffi* Lugo-Ortiz & McCafferty, 1995 (Baetidae). *Check List*, 11 (4), 1674.
- Demoulin, G. (1966). Contribution à l'étude des Ephéméroptères du Surinam. *Bull. Inst. r. Sci. nat. Belg/ Bull. K. Belg. Inst. Nat. Wet.* 42(37), 9–11.
- Diffenbaugh, N. S., & Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, 114, 813–822.
- Dijkstra, K. D. B., Monaghan, M. T., & Pauls, S. U. (2014). Freshwater biodiversity and aquatic insect diversification. *Annual review of entomology*, 59, 143–163.
- Dominique, Y., Mathuriau, C., & Thomas, A. (2001). Étude systématique du genre *Camelobaetidius* Demoulin, 1966 en Colombie [Ephemeroptera, Baetidae]. *Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Toulouse*, 137, 17–32.
- Echeverría-Sáenz, S., Mena, F., Arias-Andrés, M., Vargas, S., Ruepert, C., Van den Brink, P. J., Castillo, L., & Gunnarsson, J. S. (2016). In situ toxicity and ecological risk assessment of agro-pesticide runoff in the Madre de Dios River in Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(14), 13270–13282.
- Echeverría-Sáenz, S., Mena, F., Pinnock, M., Ruepert, C., Solano, K., De la Cruz, E., Campos, B., Sánchez-Ávila, J., Lacorte, S., & Barata, C. (2012). Environmental

hazards of pesticides from pineapple crop production in the Río Jiménez watershed (Caribbean Coast, Costa Rica). *Science of the Total Environment*, 440, 106–114.

- Echeverría-Sáenz, S., Pinnock, M., Arias, M., Mena, F., Solano, K., Rupert, C. (2011). Presencia de residuos de plaguicidas y calidad biológica del agua en el Río Jiménez, como representante de los ríos del Caribe de Costa Rica. Universidad Nacional: Heredia. Recuperado de: <http://www.observatorioambiental.una.ac.cr/index.php/indicadores-ambientales/por-recurso-natural/998-presencia-de-residuos-de-plaguicidas-y-calidad-biologica-del-rio-jimenez-caribe-de-costa-rica> Accesado el 15 de febrero del 2019.
- Esquivel, H. (2006). Libélulas de Mesoamérica y el Caribe. Editorial INBio, Costa Rica. 286, 287, 292, 293 p.
- Feio, M. J., Reynoldson, T. B., & Graça, M. A. (2006). The influence of taxonomic level on the performance of a predictive model for water quality assessment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63(2), 367–376.
- Fernández, L., & Springer, M. (2008). El efecto del beneficiado del café sobre los insectos acuáticos en tres ríos del Valle Central (Alajuela) de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 56(4), 237–256.
- Ferreira, W. R., Ligeiro, R., Macedo, D. R., Hughes, R. M., Kaufmann, P. R., Oliveira, L. G., & Callisto, M. (2014). Importance of environmental factors for the richness and distribution of benthic macroinvertebrates in tropical headwater streams. *Freshwater Science*, 33(3), 860–871.
- Firmiano, K. R., Ligeiro, R., Macedo, D. R., Juen, L., Hughes, R. M., & Callisto, M. (2017). Mayfly bioindicator thresholds for several anthropogenic disturbances in neotropical savanna streams. *Ecological indicators*, 74, 276–284.
- Flowers, R. W., & De la Rosa, C. (2010). Capítulo 4: Ephemeroptera. In: *Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica*. Springer, M., Ramírez A., & Hanson, P. Eds. *Revista de Biología Tropical*, 58, 63–93.
- Flowers, R., Astorga-Espeleta, Y., Angulo-Gutiérrez, C., Herich, A., & Fernández, S. (1995). Índice biológico para la evaluación de calidad de agua de Centroamérica. In: *Resúmenes, 2do. Congreso Centroamericano y del Caribe y 3ero. Costarricense de Entomología*. San José, Costa Rica.
- Forero-Céspedes, A. M., & Reinoso-Flórez, G. (2013). Estudio de la familia Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) en una cuenca con influencia de la urbanización y agricultura: río Alvarado-Tolima. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 25, 12–21.
- Fournier, M. L., Echeverría-Sáenz, S., Mena, F., Arias-Andrés, M., de la Cruz, E., & Rupert, C. (2018). Risk assessment of agriculture impact on the Frío River

- watershed and Caño Negro Ramsar wetland, Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(14), 13347–13359.
- Frissell, C. A., Liss, W. J., Warren, C. E., & Hurley, M. D. (1986). A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental management*, 10(2), 199–214.
- Galdean, N., Callisto, M., & Barbosa, F. A. R. (2000). Lotic ecosystems of Serra do Cipó, southeast Brazil: water quality and a tentative classification based on the benthic macroinvertebrate community. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 3(4), 545–552.
- Ganong, C. N., Small, G. E., Ardón, M., McDowell, W. H., Genereux, D. P., Duff, J. H., & Pringle, C. M. (2015). Interbasin flow of geothermally modified ground water stabilizes stream exports of biologically important solutes against variation in precipitation. *Freshwater Science*, 34(1), 276–286.
- Gattolliat, J. L., & Nieto, C. (2009). The family Baetidae (Insecta: Ephemeroptera): synthesis and future challenges. *AquaticInsects*, 31(1), 41–62.
- García-Alzate, C. A., Villegas-Acosta, P. A., & Román-Valencia, C. (2017). Análisis Físicoquímico y Biológico del río Santo Domingo, afluente río Verde, Cuenca del río La Vieja, Alto Cauca, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 21(1), 31–51.
- Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. *Journal of environmental management*, 173, 41–48.
- Guevara-Mora, M. & Bonilla-Traña, M., (2017). Diagnóstico de la percepción social y la calidad del agua de los recursos hídricos superficiales asociados a las descargas de aguas servidas, Monteverde, Puntarenas. Informe Final.
- Gutiérrez, C., & Reinoso-Flores, G. (2010). Géneros de ninfas del orden Ephemeroptera (Insecta) del departamento del Tolima, Colombia: listado preliminar. *Biota Colombiana*, 11(1–2), 23–32.
- Gutiérrez, Y., & Dias, L. G. (2015). Ephemeroptera (Insecta) de Caldas-Colombia, claves taxonómicas para los géneros y notas sobre su distribución. *Papéis Avulsos de Zoologia (São Paulo)*, 55(2), 13–46.
- Hanson, P., Springer, M., & Ramirez, A. (2010). Capítulo 1: Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos. *Revista de Biología Tropical*, 58, 3–37.
- Hellawell, J. (1986). *Biological Indicators of Freshwater pollution and Environmental Management*. Elsevier Applied Science Publ. London & New York, pp. 546.

- Herman, M. R., & Nejadhashemi, A. P. (2015). A review of macroinvertebrate-and fish-based stream health indices. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 15(2), 53–67.
- Hershey, A. E., Lamberti, G. A., Chaloner, D. T., & R. M. Northington (2010). Aquatic Insect Ecology. En: *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. Editores Thorp, J. H., & Covich, A. P. Elsevier, Academic Press. United States.
- Hubbard, R. K., Newton, G. L., & Hill, G. M. (2004). Water Quality and the Grazing Animal. *Journal of animal science*, 82(13), E255–E263.
- Instituto Costarricense de Acueductos y alcantarillados (AyA) (2017). Informe de gestión ambiental periodo 2009-2017. Elaborado por Geog. Gerardo Ramírez Villegas. Costa Rica.
- Imbach, P., Locatelli, B., Zamora, J. C., Fung, E., Calderer, L., Molina, L., & Ciais, P. (2015). Impacts of climate change on ecosystem hydrological services of Central America: water availability. In *Climate Change Impacts on Tropical Forests in Central America* (pp. 81–106). Routledge.
- Jacobus, L.M., & McCafferty, W.P. (2005). A new species and new synonym in *Camelobaetidius* Demoulin (Ephemeroptera: Baetidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 78 (2), 153–157.
- Jadin, I., Meyfroidt, P., & Lambin, E. F. (2016). International trade, and land use intensification and spatial reorganization explain Costa Rica's forest transition. *Environmental Research Letters*, 11(3), 1–13.
- Kearney, M., & Porter, W. (2009). Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology letters*, 12(4), 334–350.
- Kitchin, P. L. (2005). Measuring the amount of statistical information in the EPT index. *Environmetrics*, 16(1), 51–59.
- Klemas, V. (2014). Remote sensing of riparian and wetland buffers: an overview. *Journal of coastal research*, 30(5), 869–880.
- Kohlmann, B., Arroyo, A., Springer, M., & Vásquez, D. (2015). Agrorural Ecosystem Effects on the Macroinvertebrate Assemblages of a Tropical River. En: *Biodiversity in Ecosystems-Linking Structure and Function*. Intech Open.
- Krishnaswamy, J., Halpin, P. N., & Richter, D. D. (2001). Dynamics of sediment discharge in relation to land-use and hydro-climatology in a humid tropical watershed in Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 253(1–4), 91–109.
- Kubendran, T., Selvakumar, C., Sidhu, A. K., Nair, A., & Krishnan, S. M. (2017). Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) as Biological Indicators of Environmental Degradation in

- Tamiraparani and Vaigai River Basins of Southern Western Ghats, India. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6(6), 558–572.
- Kumar, A., Colton, M. B. M., Springer, M., & Trama, F. A. (2013). Macroinvertebrate communities as bioindicators of water quality in conventional and organic irrigated rice fields in Guanacaste, Costa Rica. *Ecological Indicators*, 29, 68–78.
- Laboratorio PRIAS (2018). Recuperado de: <http://www.snitcr.go.cr/Visor/index?k=Y2FwYTo6UHJpYXNM6OIBlcmRpZGFHYW5hbmNpYTIwMTYyMDE3> Accesado el 21 de mayo del 2019.
- Lammert, M., & Allan, J. D. (1999). Assessing biotic integrity of streams: effects of scale in measuring the influence of land use/cover and habitat structure on fish and macroinvertebrates. *Environmental Management*, 23(2), 257-270.
- Lehmkuhl, D.M. (1976). Mayflies. *Blue Jay*, 34, 70–81.
- Ley de Aguas 276 (1942). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ley General de Salud 5395 (1973). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ley Forestal 7575 (1996). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Li, A., Wang, A., Liang, S., & Zhou, W. (2006). Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS—a case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modelling*, 192(1–2), 175–187.
- Longino, J. T. (2003). The *Crematogaster* (Hymenoptera, Formicidae, Myrmicinae) of Costa Rica. *Zootaxa*, 151(1), 1–150.
- Lugo-Ortiz, C. R., & McCafferty, W. P. (1995). Taxonomy of the North and Central American species of *Camelobaetidius* (Ephemeroptera: Baetidae). *Entomological News*, 106(4), 178–192.
- Lugo-Ortiz, C.R. & McCafferty, W.P. (1996) New Central American and Mexican records of Ephemeroptera species. *Entomological News*, 107 (5), 303–310.
- Mafla Herrera, M. (2005). Guía para evaluaciones ecológicas rápidas con indicadores biológicos en ríos de tamaño mediano, Talamanca, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

- Malicky, H., & Chantaramongkol, P. (1993). The altitudinal distribution of Trichoptera species in Mae Klang catchment on Doi Inthanon, northern Thailand: stream zonation and cool-and warm-adapted groups. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, 26, 279–291.
- Mantyka-Pringle, C. S., Martin, T. G., Moffatt, D. B., Linke, S., & Rhodes, J. R. (2014). Understanding and predicting the combined effects of climate change and land-use change on freshwater macroinvertebrates and fish. *Journal of Applied Ecology*, 51(3), 572–581.
- Maurer, E. P., Adam, J. C., & Wood, A. W. (2009). Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 183–194.
- McCafferty, W. P. (201b). New Mexican and Central American Ephemeroptera records, with first species checklists for Mexican states. *Transactions of the American Entomological Society*, 137(3 & 4), 317–327.
- McCafferty, W. P. (2011a) Notable new North and Central American records of Ephemeroptera species. *Transactions of the American Entomological Society*, 137 (1–2), 1–11.
- McCafferty, W. P., Baumgardner, D.E. & Guenther, J.L. (2004) The Ephemeroptera of Central America. Part 1: Guatemala. *Transactions of the American Entomological Society*, 130, 201–219.
- McCafferty, W. P., & Randolph, R. P. (2000). Further contributions to the spatulate clawed Baetidae (Ephemeroptera). *Entomological News*, 111(4), 259–264.
- McCafferty, W. P., & Waltz, R. D. (1990). Revisionary synopsis of the Baetidae (Ephemeroptera) of North and Middle America. *Transactions of the American Entomological Society*, 116(4), 769–799.
- McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61(13), 2295–2311.
- Melo, S. M., Ragonha, F. H., Pinha, G. D., & Takeda, A. M. (2018). Effects of food availability and habitat features on the Ephemeroptera species composition at seasonal and spatial scales from neotropical floodplain rivers. *Brazilian Journal of Biology*, 78(1), 160–168.
- Mena-Rivera, L., Salgado-Silva, V., Benavides-Benavides, C., Coto-Campos, J., & Swinscoe, T. (2017). Spatial and seasonal surface water quality assessment in a tropical urban catchment: Burío River, Costa Rica. *Water*, 9(8), 1–12.

- Mena-Rivera, L., Vásquez-Bolaños, O., Gómez-Castro, C., Fonseca-Sánchez, A., Rodríguez-Rodríguez, A., & Sánchez-Gutiérrez, R. (2018). Ecosystemic Assessment of Surface Water Quality in the Virilla River: Towards Sanitation Processes in Costa Rica. *Water*, 10(7), 1–16.
- Meyer, M.D., Baumgardner, D.E. & McCafferty, W. P. (2008) The Ephemeroptera of Central America. Part 2: Nicaragua. *Transactions of the American Entomological Society*, 134 (1), 133–146.
- Ministerio de Ambiente y Energía (2014). Estado de Minería Período 2013–2014, Región Chorotega. Dirección de Geología y Minas. Responsable Geólogo Lic. Mario Gómez Venegas.
- Montoya, Y. (2008). Caracterización de la biodiversidad acuática y de la calidad de las aguas de la quebrada Los Andes, El Carmen de Viboral, Antioquia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*, 27(1), 85–91.
- Mosquera-Guerra, F. M. (2015). Estructura y composición de las comunidades de macroinvertebrados en la cuenca alta del río Caquetá. *Momentos de Ciencia*, 12(1), 25–38.
- Municipalidad de Belén & Universidad Nacional (2013). Informe de Calidad de las Aguas Superficiales. Universidad Nacional, Laboratorio de Análisis Ambiental. Heredia, Costa Rica.
- Municipalidad de Curridabat (2015). Evaluación Biológica de la Calidad del Agua en la Micro Cuenca del Ríos María Aguilar, cantón de Curridabat. Dirección de Servicios Ambientales, San José, Costa Rica.
- Nava-López, M. Z., Diemont, S. A., Hall, M., & Ávila-Akerberg, V. (2016). Riparian buffer zone and whole watershed influences on river water Quality: implications for ecosystem services near megacities. *Environmental Processes*, 3(2), 277–305.
- Nieto, C. (2003). El género *Camelobaetidium* (Ephemeroptera: Baetidae) en la Argentina. *Acta zoológica mexicana*, (88), 233–255.
- Oksanen, J., Blanchet, G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P., O'Hara, P., Simpson, G., Solymos, P., Henry, M., Stevens, H., Eduard Szoecs E., y Wagner H. (2019). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-6. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Padowski, J. C., Gorelick, S. M., Thompson, B. H., Rozelle, S., & Fendorf, S. (2015). Assessment of human–natural system characteristics influencing global freshwater supply vulnerability. *Environmental Research Letters*, 10(10), 104014.
- Peinador, M. (2004). Relación entre los macroinvertebrados bénticos y la calidad del agua en ríos de Costa Rica. *Revista Evolución*, 2(2), 1–22.

- Pérez-Rubio, I., & Mende, A. (2018). Análisis espacial de susceptibilidad de erosión en una cuenca hidrográfica del trópico húmedo de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(1), 1–26.
- Pillasagua, J. (2018). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad hídrica en usos de suelo bosque, urbano y agrícola en el ríos San Pablo, cantón La Mana, Ecuador. Tesis pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.
- Polato, N. R., Gill, B. A., Shah, A. A., Gray, M. M., Casner, K. L., Barthelet, A., Messer, P., Simmons, M., Guayasamin, J., Encalada, A., Kondratieff, B. C., Flecker, A., Thomas, S., Ghalambor, C., Poff, N., Funk, & W., Zamudio, K. (2018). Narrow thermal tolerance and low dispersal drive higher speciation in tropical mountains. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(49), 12471–12476.
- Pyne, M. I., & Poff, N. L. (2017). Vulnerability of stream community composition and function to projected thermal warming and hydrologic change across ecoregions in the western United States. *Global change biology*, 23(1), 77–93.
- Ramírez, A., & Gutiérrez-Fonseca, P. E. (2014). Estudios sobre macroinvertebrados acuáticos en América Latina: avances recientes y direcciones futuras. *Revista de Biología Tropical*, 62, 9–20.
- Ramírez, Y. P., Giraldo, L. P., Zúñiga, M. D. C., Ramos, B. C., & Chará, J. (2018). Influencia de la Ganadería en los Macroinvertebrados Acuáticos en Microcuencas de los Andes Centrales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(3), 1244–1257.
- Randolph, R. P. & McCafferty, W.P. (2001). New species and records of Ephemeroptera (Insecta) from central Mexico. *Dugesiana*, 8, 15–21.
- Rasmussen, J. J., Reiler, E. M., Carazo, E., Matarrita, J., Muñoz, A., & Cedergreen, N. (2016). Influence of rice field agrochemicals on the ecological status of a tropical stream. *Science of the Total Environment*, 542, 12–21.
- R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reglamento de Vertidos 33601 MINAE-S (2007). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Reglamento a la Ley Forestal 25721 (1997). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ríos, T., González, G., & Vega, J. A. B. (2015). Diversidad de insectos acuáticos y calidad del agua de los ríos David y Mula, provincia de Chiriquí, Panamá. *Gestión y Ambiente*, 18(1), 113-128.

- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254–274.
- Rojas, J. (2018). Contaminación por metales en aguas, sedimentos y macroinvertebrados bentónicos de los ríos San José y Cañas, generados por las lamas de la antigua mina La Esperanza, Líbano de Tilarán, Guanacaste, Costa Rica. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, Nicaragua.
- Rosales, A. (2016). Leyenda CLC-CR para la generación de uso/cobertura de la tierra de Costa Rica (Leyenda Corine Land Cover versión Costa Rica v 1.0) San José, CR: MAG/INTA, pp. 104.
- Roubik, D. W., & Hanson, P. E. (2004). Abejas de orquídeas de la América tropical: Biología y guía de campo. Editorial INBio, Heredia, Costa Rica.
- Roy, A., H., Rosemond, A., D., Paul, M., J., Leigh, D., S., Wallace, J., B. (2003). Stream macroinvertebrate response to catchment urbanization (Georgia, USA). *Freshwater Biology*, 48, 329-346.
- Rúa, G., Tamaris, C., & Zúñiga, M. D. C. (2015). Composición y distribución de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (Insecta) en ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Revista de Ciencias*, 19(2), 11–29.
- Salles F.F., Boldrini R., Nascimento JMC., Angeli, KB., Massariol, FC., Raimundi E. (2016). Recuperado de: <http://ephemeroptera.com.br/lista/> Accesado el 02 de abril del 2018.
- Salles, F. F., Domínguez, E., Molineri, C., Boldrini, R., Nieto, C., & Dias, L. G. (2018). Order Ephemeroptera. En: Thorp and Covich's *Freshwater Invertebrates* (pp. 61-117). Academic Press.
- Salles, F. F., & Serrão, J. E. (2005). The nymphs of the genus *Camelobaetidius* Demoulin (Ephemeroptera: Baetidae) in Brazil: new species, new records, and key for the identification. *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.* 2005, 41 (4), 267–279.
- Salvarrey, A. V., Kotzian, C. B., Spies, M. R., & Braun, B. (2014). The influence of natural and anthropic environmental variables on the structure and spatial distribution along longitudinal gradient of macroinvertebrate communities in southern Brazilian streams. *Journal of Insect Science*, 14(1), 1–23.
- Santamaría, E. E., & Vega, J. A. B. (2016). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad del agua en la cuenca alta del río Chiriquí Viejo, provincia de Chiriquí, Panamá. *Tecnociencia*, 18(1), 5–24.

- Sartori, M., & Brittain, J. E. (2015). Order Ephemeroptera. In Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates (pp. 873–891). Academic Press.
- Schmidt-Kloiber, A., & Nijboer, R. C. (2004). The effect of taxonomic resolution on the assessment of ecological water quality classes. *Hydrobiologia*, 516, 269–283.
- Setegn, S. G., & Donoso, M. C. (2015). Sustainability of Integrated Water Resources Management. Springer International Publishing: Cham, Suiza.
- Shah, A. A., Funk, W. C., & Ghalambor, C. K. (2017a). Thermal acclimation ability varies in temperate and tropical aquatic insects from different elevations. *Integrative and comparative biology*, 57(5), 977–987.
- Shah, A. A., Gill, B. A., Encalada, A. C., Flecker, A. S., Funk, W. C., Guayasamin, J. M., Kondratieff, B., Poff, L., Thomas, S., Zamudio, K., & Ghalambor, C. K. (2017b). Climate variability predicts thermal limits of aquatic insects across elevation and latitude. *Functional Ecology*, 31(11), 2118–2127.
- Sibaja-Araya, F., & Esquivel, C. (2018). *Camelobaetidius guaycara*, a new species of Baetidae (Ephemeroptera) from Costa Rica, Central America. *Zootaxa*, 4434(1), 89–98.
- Sibaja-Araya, F., & Esquivel, C. (2020). Redescription of four species of *Camelobaetidius* Demoulin, 1966 (Ephemeroptera: Baetidae) from Central and North America. *Zootaxa*, 4758(2), 257–274.
- Sommaggio, D., & Burgio, G. (2014). The use of Syrphidae as functional bioindicator to compare vineyards with different managements. *Bulletin of Insectology*, 67(1), 147–156.
- Spellman, 2010. Pollution: What Is It?, en: Science of Enviromental Pollution. 2 Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, EUA.
- Springer, M. (2010). Capítulo 3: Biomonitorio acuático. *Revista de Biología Tropical*, 58, 53–59.
- Stathatou, P. M., Kampragou, E., Grigoropoulou, H., Assimacopoulos, D., Karavitis, C., Porto, M. F. A., Gironás, J., Vanegas, M., & Reyna, S. (2016). Vulnerability of water systems: a comprehensive framework for its assessment and identification of adaptation strategies. *Desalination and Water Treatment*, 57(5), 2243–2255.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
- Sweeney, B. W., & Newbold, J. D. (2014). Streamside forest buffer width needed to protect stream water quality, habitat, and organisms: a literature review. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(3), 560–584.

- Traver, J. R. & Edmunds, G., F. (1968). A Revision of the Baetidae with Spatulated-Clawed Nymphs. *Pacific Insects*, 10(3-4), 629–677.
- Varela, I. (2007). Estudio de la Gestión municipal del agua: enfoque de “gestión de la demanda del agua” en Costa Rica y en países con mayor grado de gestión del recurso hídrico. Centro de Investigación en Protección Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Valverde, N., Caicedo, O., & Aguirre, N. (2009). Análisis de calidad de agua de la quebrada La Ayurá, con base en variables fisicoquímicas y macroinvertebrados acuáticos. *Revista Producción + Limpia*, 4(1), 40–60.
- Villada-Bedoya, S., Bautista, F. O., Dias, L. G., & Varón, J. V. E. (2017). Diversidad de insectos acuáticos en quebradas impactadas por agricultura y minería, Caldas, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 65(4), 1635–1659.
- Watts, C., Stringer, I., Innes, J., & Monks, J. M. (2017). Evaluating tree wētā (Orthoptera: Anostostomatidae: Hemideina species) as bioindicators for New Zealand national biodiversity monitoring. *Journal of insect conservation*, 21(4), 583–598.
- Wiersema, N.A. (1998). *Camelobaetidius variabilis* (Ephemeroptera: Baetidae), a new species from Texas, Oklahoma and Mexico. *Entomological News*, 109, 21–26.
- Wiersema, N. A., & Baumgardner, D. E. (2000). Distribution and taxonomic contributions to the Ephemeroptera fauna of Mexico and Central America. Distribución y contribuciones taxonómicas para la fauna de Ephemeroptera México y Centroamérica. *Entomological News*. 111(1), 60–66.
- Widyastuti, W., & Suprayogi, S. (2016). Contamination Vulnerability Analysis of Watershed for Water Quality Monitoring. *Forum Geografi*. 20(1), 47–54.

9. Anexos

Anexo 1.1 Material examinado para la revisión taxonómica

Camelobaetidius guaycara (Morfoespecie 1).

01/IV/2014. R. Bonilla, Cuenca del río Reventazón, Bonilla, Cartago. Col. M. Herrera. n: **3** individuos. Elevación: 279 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 542814,936 Lat, 1107379,304 Lon.

23/IV/2015. R. Atirro, Cuenca del río Reventazón, Atirro, Cartago. Col. M. Herrera. n: **13** individuos. Elevación: 596 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

17/VI/2016. Q. Manigordo, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **3** individuos. Sustrato rocoso. Elevación: 75 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

15/X/2016. Q. Playa Hermosa, Playa Hermosa, Uvita, Puntarenas. Col. F. Sibaja, F. Acuña. n: **6** individuos. Elevación: 14 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 523673,267 Lat, 1017085,233 Lon.

15/X/2016. Q. Poza Azul, junto a captación AyA, Dominical, Uvita, Puntarenas. Col. F. Sibaja, F. Acuña. n: **1** individuo. Elevación: 30 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 515372,866 Lat, 1023007,428 Lon.

11/XII/2016. Q. Tortuga, San Rafael, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **1** individuo. Raspado en piedras. Elevación: 181 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 521746,540 Lat, 1132879,266 Lon.

04/I/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **1** individuo. En hojarasca a orilla de cauce. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 605017,693 Lat, 960683,510 Lon.

18/I/2017. R. Jiménez, Duacaré, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, F. Bravo, S. Echeverría. n: **10** individuos. Sustrato rocoso. Elevación: 45 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 541244,848 Lat, 1139107,937 Lon.

19/III/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **12** individuos. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 605017,693 Lat, 960683,510 Lon.

15/IV/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **19** individuos. Sobre y bajo piedras. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 605017,693 Lat, 960683,510 Lon.

15/VI/2017. R. Jiménez, Duacaré, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, F. Bravo, S. Echeverría. n: **40** individuos. Elevación: 45 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 541244,848 Lat, 1139107,937 Lon.

19/VII/2017. Q. Manigordo, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **2** individuos. Elevación: 75 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

19/VII/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **20** individuos. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

Morfoespecie 2.

01/IV/2016. R. Cañas, punto 3, Líbano, Cañas, Guanacaste. Col. HIDROSEC, Johana Rojas. n: **8** individuos. Coordenadas: 391089 E, 1152679 N.

31/III/2016. R. Cañas, punto 4, Líbano, Cañas, Guanacaste. Col. HIDROSEC, Johana Rojas. n: **7** individuos. Elevación: 256 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 391090,752 Lat, 1152686,185 Lon .

Morfoespecie 3.

23/IV/2015. R. Atirro, Cuenca del río Reventazón, Atirro, Cartago. Col. M. Herrera. n: **2** individuos. Elevación: 596 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

11/XII/2016. Q. Tortuga, San Rafael, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **7** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 181 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 521746,540 Lat, 1132879,266 Lon.

11/XII/2016. R. San Rafael, San Rafael, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **9** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 183 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 521561,958 Lat, 1132772,639 Lon.

15/VI/2017. R. Jiménez, Duacaré, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja. n: **4** individuos. Elevación: 45 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 541244,848 Lat, 1139107,937 Lon.

Morfoespecie 4.

22/IX/2016. Q. Negra, Reserva Natural Karen Mogensen, Península de Nicoya, Lepanto, Puntarenas. Col. F. Sibaja, D. Romero, F. Bravo, CEH. n: **9** individuos. Pared rocosa, poca corriente. Elevación: 297 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 383864,478 Lat, 1090593,530 Lon.

22/IX/2016. R. Blanco, Reserva Natural Karen Mogensen, Península de Nicoya, Lepanto, Puntarenas. Col. F. Sibaja, D. Romero, F. Bravo, CEH. n: **3** individuos. Raspado rocas. Elevación: 297 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 383864,478 Lat, 1090593,530 Lon.

Morfoespecie 5.

17/VI/2016. Q. Manigordo, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **2** individuos. Sustrato rocoso. Elevación: 75 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

01/I/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **1** individuos. Sobre piedras. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

19/III/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **13** individuos. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

15/IV/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **20** individuos. Sobre piedras. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

19/VII/2017. Q. Manigordo, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **1** individuo. Elevación: 75 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

19/VII/2017. R. Claro, San Ramón de Río Claro, Río Claro, Golfito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **4** individuos. Elevación: 75 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 538077,724 Lat, 1088133,294 Lon.

Morfoespecie 6.

15/I/2014. R. Peje, Cuenca del río Reventazón, Altos Herediana, Limón. Col. M. Herrera. n: **1** individuo. Elevación: 40 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 552162,333 Lat, 1123296,221 Lon.

11/XII/2016. R. San Rafael, San Rafael, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **7** individuos. Elevación: 183 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 521561,958 Lat, 1132772,639 Lon.

11/XII/2016. Q. Tortuga, San Rafael, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **6** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 181 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 521746,540 Lat, 1132879,266 Lon.

15/VI/2017. R. Jiménez, Duacarí, Guápiles, Pococí, Limón. Col. F. Sibaja, F. Bravo, S. Echeverría. n: **1** individuo. Elevación: 45 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 541244,848 Lat, 1139107,937 Lon.

Morfoespecie 7.

20/XI/2014. R. Aquiares, por puente, Santa Cruz, Turrialba, Cartago. Col. CEH, D. Romero, O. Vásquez. n: **1** exuvia y **4** individuos. Elevación: 1515 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 528649,188 Lat, 1 102322,975 Lon.

24/III/2016. R. Colima, en rápidos, El Líbano, Santa Teresita, Turrialba, Cartago. Col. D. Romero. n: **3** individuos. Elevación: 1127 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 535674,739 Lat, 1106224,652 Lon.

04/IV/2016. R. San Luis, sitio 1, San Luis, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **3** individuos. Elevación: 732 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409988,366 Lat, 1135819,157 Lon.

04/IV/2016. R. San Luis, sitio 4, San Luis, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **3** individuos. Elevación: 956 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 412487,947 Lat, 1136522,396 Lon.

05/IV/2016. R. Guacimal, sitio 2, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **3** individuos. Elevación: 720 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409933,798 Lat, 1135856,360 Lon.

05/IV/2016. R. San Luis, sitio 1, San Luis, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **5** individuos. Elevación: 732 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409988,366 Lat, 1135819,157 Lon.

17/IV/2016. R. Ángel, por puente, San Martín, Alajuela. Col. F. Bravo. n: **3** individuos. Elevación: 880 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 480778,138 Lat, 1134373,240 Lon.

24/VIII/2016. R. San Luis, sitio 1, San Luis, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **1** individuo. Elevación: 732 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409988,366 Lat, 1135819,157 Lon.

15/XI/2016. R. Ángel, por puente, San Martín, Alajuela. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **5** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 880 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 480778,138 Lat, 1134373,240 Lon.

22/I/2017. R. Torito, por puente, La Fuente de Santa Teresita, Turrialba, Cartago. Col. D. Romero. n: **1** individuo. Elevación: 1050 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 535347,621 Lat, 1104281,055 Lon.

20/II/2017. R. Chirripó, por puente, Chimirols, Rivas, San Isidro del general, Pérez Zeledón, San José. Col. F. Sibaja, F. Acuña. n: **1** individuo. Elevación: 1003 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 540855,333 Lat, 1043124,298 Lon.

28/II/2017. R. Torito, por puente, La Fuente de Santa Teresita, Turrialba, Cartago. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **5** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 1050 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 535347,621 Lat, 1104281,055 Lon.

23/IV/2017. R. Ángel, por puente, San Martín, Alajuela. Col. F. Sibaja, D. Romero, F., Bravo. n: **4** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 880 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 480778,138 Lat, 1134373,240 Lon.

Morfoespecie 8.

23/X/2014. Q. Segunda, Buena vista, Ciudad Quesada, San Carlos, Alajuela. Col. CEH, D. Romero, E. Lobo. n: **1** individuo. Raspado en piedras. Elevación: 973 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 450567,667 Lat, 1135349,851 Lon.

15/XI/2016. R. Ángel, por puente, San Martín, Alajuela. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **13** individuos. Raspado en piedras y hojarasca. Elevación: 880 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 480778,138 Lat, 1134373,240 Lon.

Morfoespecie 9.

30/X/2015. R. Tibás, Santo Domingo de Heredia, Heredia/San José. Col. O. Vásquez. n: **2** individuos. Elevación: 1109 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 491023,931 Lat, 1102667,968 Lon.

04/IV/2016. R. Guacimal, sitio 2, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **6** individuos. Elevación: 720 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409933,798 Lat, 1135856,360 Lon.

05/IV/2016. Q. Rodríguez, sitio 1, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **5** individuos. Elevación: 1182 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 408394,522 Lat, 1140849,110 Lon.

31/IV/2016. R. San Luis, sitio 1, San Luis, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **6** individuos. Elevación: 732 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409988,366 Lat, 1135819,157 Lon.

31/V/2016. R. Guacimal, sitio 2, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **3** individuos. Elevación: 720 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409933,798 Lat, 1135856,360 Lon.

07/VII/2016. R. Ciruelas, Birri, Heredia. Col. F. Sibaja, F. Bravo. n: **2** individuos. Raspado centro de cauce. Elevación: 1366 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 483427,990 Lat, 1113541,466 Lon.

25/VIII/2016. Q. Rodríguez, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **4** individuos. Elevación: 1182 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 408394,522 La, 1140849,110 Lon.

29/X/2016. Q. Tambor, Santo Domingo, Pérez Zeledón, San José. Col. D. Romero. n: **3** individuos. Rápidos raspado. Elevación: 925 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 550660,365 Lat, 1030082,500 Lon.

08/I/2017. Q. Borbón, Brasilia, Sabalito, San Vito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **1** individuo. Elevación: 924 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 621263,685 Lat, 972827,123 Lon.

30/XII/2017. Q. Borbón, Brasilia, Sabalito, San Vito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **3** individuos. Elevación: 924 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 621263,685 La, 972827,123 Lon.

Morfoespecie 10.

09/IX/2014. R. Sombrero, Cuenca del río Reventazón, Orosi, Cartago. Col. CEH, D. Ruíz, A. Avendaño. n: **1** individuo. Elevación: 1361msnm; orden del río: 3; coordenadas: 510116,154 Lat; 1081416,411 Lon.

24/II/2018. R. Bonilla, Cuenca del río Reventazón, Puente antes de Iglesia, Bonilla, Santa Cruz, Turrialba, Cartago. Col. D. Romero. n: **8** individuos. Elevación: 1403 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 205018 E, 1109020 N.

Morfoespecie 11.

24/III/2016. R. Colima, en rápidos, El Líbano, Santa Teresita, Turrialba, Cartago. Col. D. Romero. n: **9** individuos. Elevación: 1127 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 535674,739 Lat, 1106224,652 Lon.

15/XI/2016. R. Ángel, por puente, San Martín, Alajuela. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **11** individuos. Raspado piedras y hojarasca de corriente. Elevación: 880 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 480778,138 Lat, 1134373,240 Lon.

28/II/2017. R. Torito, por puente, La Fuente de Santa Teresita, Turrialba, Cartago. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **30** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 1050 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 535347,621 Lat, 1104281,055 Lon.

23/IV/2017. R. Ángel, por puente, San Martín, Alajuela. Col. F. Sibaja, D. Romero, F., Bravo. n: **26** individuos. Raspado en piedras. Elevación: 880 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 480778,138 Lat, 1134373,240 Lon.

31/V/2016. Q. Máquina, sitio 7, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **2** individuos. Elevación: 1350 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 411094,587 Lat, 1140134,123 Lon.

31/V/2016. R. San Luis, sitio 1, San Luis, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **2** individuos. Elevación: 732 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409988,366 Lat, 1135819,157 Lon.

05/IV/2016. R. San Luis, sitio 1, San Luis, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **5** individuos. Elevación: 732 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409988,366 Lat, 1135819,157 Lon.

04/IV/2016. R. Guacimal, sitio 2, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **3** individuos. Elevación: 720 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 409933,798 Lat, 1135856,360 Lon.

05/IV/2016. Q. Cuecha, Charly, sitio 6, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **3** individuos. Elevación: 1435 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 411842,475 Lat, 1139567,233 Lon.

05/IV/2016. Q. Rodríguez, sitio 1, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **1** individuo. Elevación: 1182 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 408394,522 Lat, 1140849,110 Lon.

24/VIII/2016. Q. Cuecha, sitio 5, Monteverde, Puntarenas. Col. M. Guevara. n: **4** individuos. Elevación: 1391 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 411341,275 Lat, 1139522,140 Lon.

08/I/2017. Q. Borbón, Brasilia, Sabalito, San Vito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **16** individuos. Elevación: 924 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 621263,685 Lat, 972827,123 Lon.

30/XII/2017. Q. Borbón, Brasilia, Sabalito, San Vito, Puntarenas. Col. F. Sibaja. n: **8** individuos. Elevación: 924 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 621263,685 Lat, 972827,123 Lon.

Morfoespecie 12.

20/XI/2014. R. Aquiares, por puente, Santa Cruz, Turrialba, Cartago. Col. CEH, D. Romero, O. Vásquez. n: **4** exuvias y **4** individuos. Elevación: 1515 msnm; orden del río: 3; coordenadas: 528649,188 Lat, 1 102322,975 Lon.

30/X/2015. R. Tibás, Santo Domingo de Heredia, Heredia/San José. Col. O. Vásquez. n: **3** individuos. Elevación: 1109 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 491023,931 Lat, 1102667,968 Lon.

07/VI/2016. R. Ciruelas, Birri, Heredia. Col. F. Sibaja, F. Bravo. n: **2** individuos. Raspado orilla. Elevación: 1366 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 483427,990 Lat, 1113541,466 Lon.

17/VII/2016. R. Porrosatí, 1 km arriba puente, San José de la Montaña, Heredia. Col. F. Sibaja, D. Romero. n: **11** individuos. Raspado orilla. Elevación: 1762 msnm; orden del río: 1; coordenadas: 488348,491 Lat, 1114252,508 Lon.

03/XI/2016. Q. Seca, Belén, Heredia. Col. D. Romero, CEH, O. Lizano. n: **3** individuos. Elevación: 906 msnm; orden del río: 2; coordenadas: 478939,874 Lat, 1103459,741 Lon.

Morfoespecie 13.

20/II/2017. R. Chirripó, por puente, Chimiroles, Rivas, San Isidro del general, Pérez Zeledón, San José. Col. F. Sibaja, F. Acuña. n: **9** individuos. Elevación: 1003 msnm; orden del río: 4; coordenadas: 540855,333 Lat, 1043124,298 Lon.

Anexo 1.2 Metodología de recolecta de macroinvertebrados según Decreto 33903-MINAE-S (2007)

Artículo 13.—**Metodología de muestreo.** El presente Reglamento define tres metodologías de muestreo en función de las características físicas de los cuerpos de agua, y una metodología alternativa en caso de duda de los resultados obtenidos, habiendo aplicado las metodologías “a” y “b”. Las metodologías son:

a. Ríos y quebradas con profundidades iguales o menores a 1 metro, y ancho igual o menor a 15 metros.

i. Técnica: Red de mano con malla de 500 μm . y apertura de 20 a 25 cm.

ii. Zona de muestreo: Diferentes micro-hábitats dentro del río.

iii. Mecanismo de muestreo: muestra compuesta de tres sub-muestras con red de mano, cada una recolectada en un tiempo de 5 minutos. El muestreo se realiza con el desplazamiento por los micro-hábitats identificados en el sitio, removiendo el fondo del río y colectando el material removido en la red. En caso de que el volumen de la muestra resulte inmanejable, se podrá proceder a una división aleatoria de la muestra, en la cual cada submuestra será representativa de la muestra total.

iv. Preservación de la muestra: con etanol de 96°; preservación de los organismos: en etanol de 70°.

b. Ríos y quebradas con profundidades mayores a 1 metro, y ancho mayor a 15 metros.

i. Técnica: Red de mano con malla de 500 μm . y apertura de 20 a 25 cm.

ii. Zona de muestreo: Orillas hasta 1 metro de profundidad, ubicando diferentes micro-hábitats dentro del río, removiendo el fondo del río y colectando el material removido en la red.

iii. Mecanismo de muestreo: Muestra compuesta de tres sub-muestras con red de mano, cada una recolectada en un tiempo de 5 minutos. El muestreo se realiza con el desplazamiento por los micro-hábitats identificados en el sitio, removiendo el fondo del río y colectando el material removido en la red. En caso de que el volumen de la muestra resulte inmanejable, se podrá proceder a una división aleatoria de la muestra, en la cual cada submuestra será representativa de la muestra total.

iv. Preservación de la muestra: Utilización de etanol de 96°; preservación de los organismos: en etanol de 70°.

- c. Ríos y quebradas de difícil acceso o donde no se pueda utilizar Red de Mano
- i. Técnica: Sustrato artificial consistente en adoquines dentro de mallas de plástico, según el protocolo de muestreo del Apéndice II.
 - ii. Número de sustratos por punto de muestreo: 4.
 - iii. Distancia entre sustratos: 10 metros.
 - iv. Zona de muestreo: Diferentes micro-hábitats dentro del río.
 - v. Tiempo de exposición: Mínimo 30 días entre la colocación y la recolección.
 - vi. Mecanismo de muestreo: Recolección de los sustratos artificiales, limpieza y concentración del material (ver protocolo de muestreo).
 - vii. Preservación de la muestra: Utilización de etanol de 96°; preservación de los organismos: en etanol de 70°.

En caso de duda de los resultados del muestreo realizado con las metodologías “a” y “b”, se deberá recurrir al método de la colecta directa, basado en el muestreo manual con pinzas, por un tiempo de 120 minutos. Se hace una colecta de todo tipo de sustratos encontrados en los diferentes microhábitats, tales como piedras, hojarasca, madera. Con los sustratos de gran tamaño, se podrán recolectar los organismos directamente haciendo uso de las pinzas y con los sustratos pequeños (piedras pequeñas, hojas por ejemplo), se colocarán dentro de una bandeja blanca, de fondo plano que contiene agua a un nivel que apenas cubra la superficie del fondo. Los organismos en la bandeja con agua, empezarán a moverse, lo que facilita su observación y recolección. Todos los organismos recolectados se colocan en un vial con alcohol de 70°, debidamente rotulado.

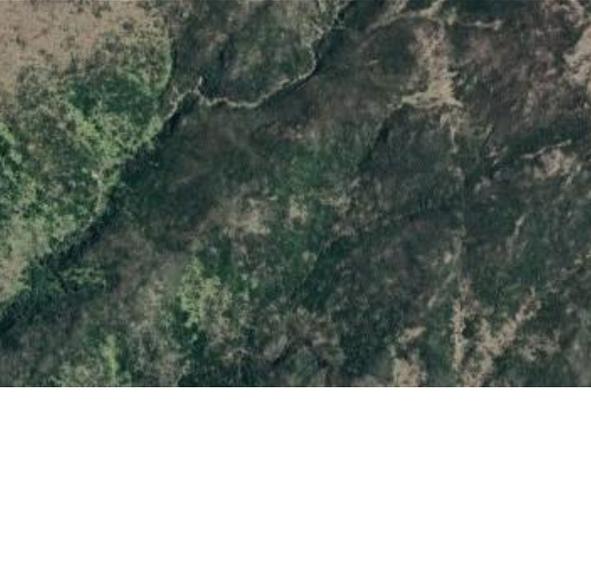
Anexo 2. Clasificación Corine Land Cover Costa Rica utilizada en la presente investigación.

Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Banano	<p>El Banano (<i>Musa spp.</i>) y el plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) son plantas herbáceas perennes gigantes de la familia Musaceae, con rizoma corto y tallo aparente, con altura que varía entre 3.5 y 7.5 metros. Las hojas son muy grandes y dispuestas en forma espiral.</p>	
Bosque de galería	<p>Son coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicada en los márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y drenajes naturales</p>	
Bosque denso	<p>Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman estratos de copas más o menos continuos, con una altura superior a cinco metros. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales.</p>	

Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Bosque secundario	<p>Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos y arbustivos, los cuales forman estratos de copa menos continuos, con una altura superior a cinco metros. Estas formaciones vegetales si han sido intervenidas y se ha alterado su estructura original y las características funcionales. Tierras con una superficie mínima de 0.5 hectáreas, y con una densidad no menor a 500 árboles por hectáreas de las especies, con diámetro mínimo a la altura del pecho de 5 cm.</p>	
Café	<p>Cobertura dominante compuesta por áreas dedicadas al cultivo de café (<i>Coffea sp.</i>). Con sombra (temporal o permanente, generado por una cobertura arbórea) o sin sombra.</p>	
Caña de azúcar	<p>Cobertura dominante compuesta por cultivo de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i> L), planta gramínea tropical de la familia Poaceae de donde se extrae el azúcar, con forma de pasto gigante.</p>	

Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Charral/Pastos encharralados	Cobertura vegetal correspondiente al primer estado de la regeneración natural en áreas intervenidas por el hombre o afectadas por eventos naturales. Es una cobertura donde domina la vegetación arbustiva, con presencia de pastos y/o hierbas y de plantas relativamente altas no leñosas (matorral).	
Cultivos confinados	Comprenden las tierras ocupadas por cultivos bajo infraestructura de invernaderos, principalmente dedicadas a cultivo de flores y follajes. Incluye toda aquella infraestructura cerrada cubierta por materiales transparentes o no (plástico o sarán), dentro del cual es posible obtener unas condiciones artificiales de microclima.	
Estanques para acuicultura	Cuerpos de agua artificial destinados a la cría de crustáceos, moluscos, peces, anfibios y reptiles.	
Hortalizas	Nombra a un grupo de plantas cultivadas generalmente en huertas o bajo riego, que se consumen como alimento, ya sea de forma cruda o preparada culinariamente. Incluye las legumbres verdes, no incluyen las frutas ni los cereales.	

Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Lagunas	Superficies o depósitos de agua naturales de carácter abierto o cerrado, que pueden estar conectadas o no a un río o al mar.	
Áreas cubiertas de nubes y sombras/Nubes	Son aquellas áreas donde no se pueden clasificar las coberturas y usos de la tierra; debido a la presencia de nubes y sombras en las imágenes satelital o en las fotografías aéreas.	
Océanos y mares/Océano	Comprende los cuerpos de agua salada que delimitan el territorio nacional (Océano Pacífico y Mar Caribe).	
Otros cultivos anuales	Son las tierras ocupadas por cultivos anuales como el maíz, melón, sandía y tomate.	

Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Otros cultivos permanentes	Cobertura dominante compuesta por cultivos permanentes como bambú, palmito, cacao y plantas ornamentales sin infraestructura cerrada cubierta plástica o sarán.	
Palma aceitera	Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>), plantas perenne de tronco solitario y hojas pinnadas perteneciente a la familia Arecaceae, que puede alcanzar alturas de hasta 12 metros.	
Páramo	Esta cobertura se localiza en zonas de alta montaña, por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar. Está constituida principalmente de hierbas y arbustos de hojas pequeñas y de baja estatura. Abundan los bambús enanos, como la chusquea (<i>Chusquea subtessellata</i>); así como gramíneas ciperáceas, helechos y varios tipos de pasto. También se observan arbustos de hojas coriáceas (duras).	

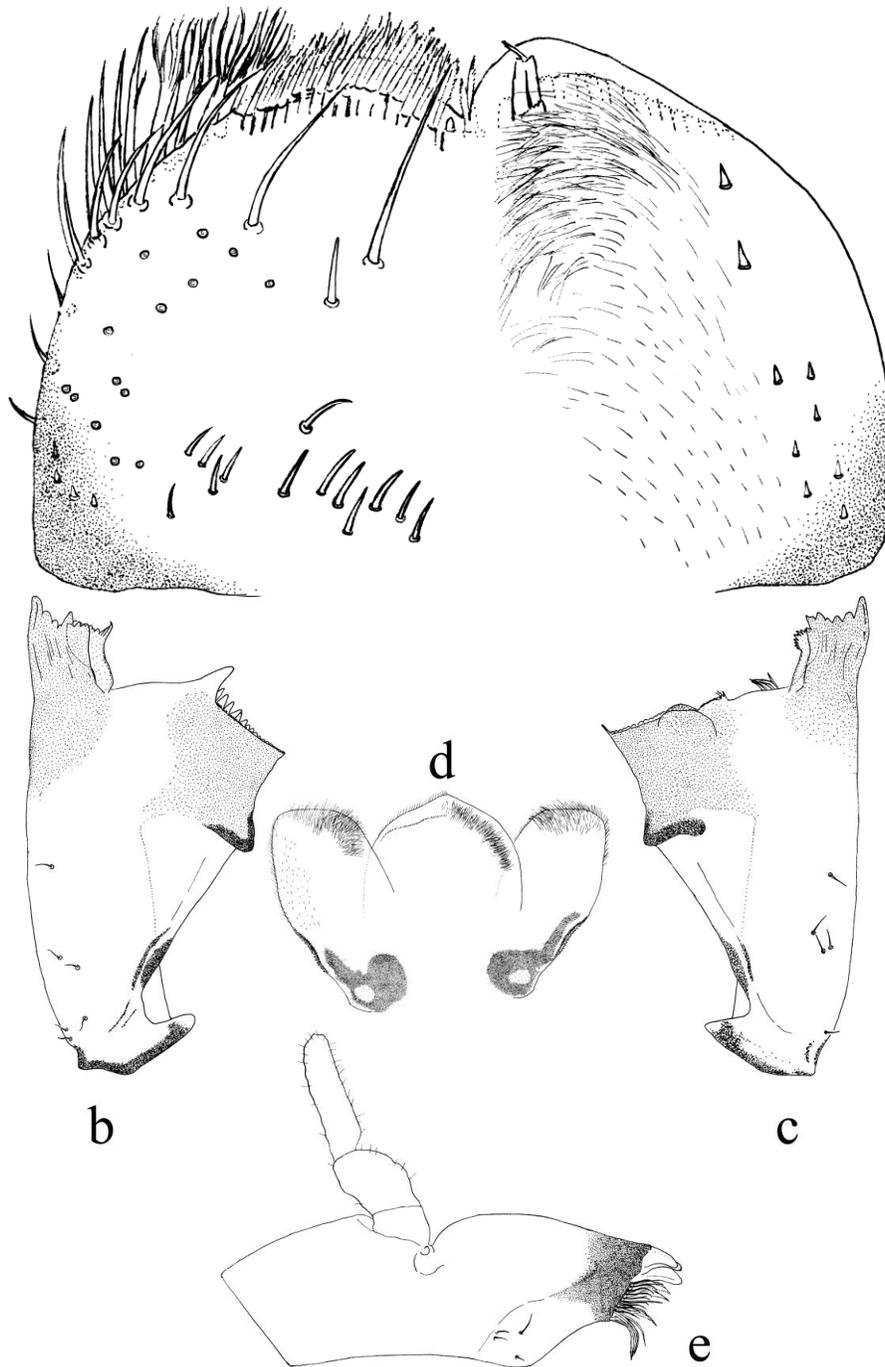
Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Parque eólico*	Áreas abiertas sin vegetación con torres eólicas instaladas para la generación eléctrica.	
Pastos arbolados	Cobertura que incluye las tierras cubiertas con pastos con presencia de árboles de altura superior a 5 metros distribuidos en forma dispersa y producto más de un proceso natural que de la intervención humana. La cobertura de árboles debe ser mayor al 15% y menor al 30% del área.	
Pastos limpios	En Costa Rica, esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos con un porcentaje de cobertura mayor al 85%. Sin la presencia o el desarrollo de malezas. Incluye pastos de corta, pastos para ensilaje y heno. La presencia de árboles y/o arbustos no va más allá del 15% del área de pastos. Los árboles se ven dispersos sin un patrón de siembra definido.	

Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Piña	<p>La piña, <i>Anana ssp</i> perteneces a la familia Bromeliaceae. Se siembra principalmente la variedad MD 2 o Golden.</p>	
Plantación forestal	<p>Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención del hombre con fines de manejo forestal. En este proceso se constituyen rodales forestales, establecidos mediante plantación y/o la siembra durante el proceso de forestación o reforestación, para la producción de madera o bienes no maderables.</p>	
Playas y arenas/Playa arenosa	<p>Son territorios bajos y planos constituidos por suelos arenosos y pedregosos, generalmente desprovistos de vegetación o cubiertos por vegetación de matorral ralo y bajo. Se trata principalmente de las playas litorales y las playas de ríos o bancos de arena de los ríos.</p>	
Red vial/Caminos	<p>Es toda superficie terrestre, pública o privada, por donde circulan peatones y vehículos, que está señalizada y bajo jurisdicción de las autoridades nacionales y/o cantonales, responsables de la aplicación de las leyes de tránsito. La red vial, llámese autopistas, carreteras, calles, avenidas, caminos y veredas, y se</p>	

Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
	encuentren pavimentadas o no, estructuran el espacio y conectan las diferentes poblaciones del país.	
Ríos, quebradas y arroyos (yurros)/Ríos	Son las corrientes naturales de agua, permanente o intermitente, poseen caudal variable, permanente o estacional y desemboca en el mar, en un lago o en otro río. Incluye: Islotes, bancos de arena y meandros recortados en procesos de sedimentación.	
Tacotal	Es una fase sucesiva al charral, en donde emergen árboles de rápido crecimiento y exigentes de luz, alcanzando los cinco a diez metros de altura, siempre con un sotobosque denso dominado por arbustos. Se caracteriza por la presencia de poca cantidad de árboles.	
Tierras desnudas o degradadas/ Tierras desnudas	Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema; como deslizamientos y depósitos de materiales. Se pueden incluir las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en procesos intensos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas y los deslizamientos en masa.	

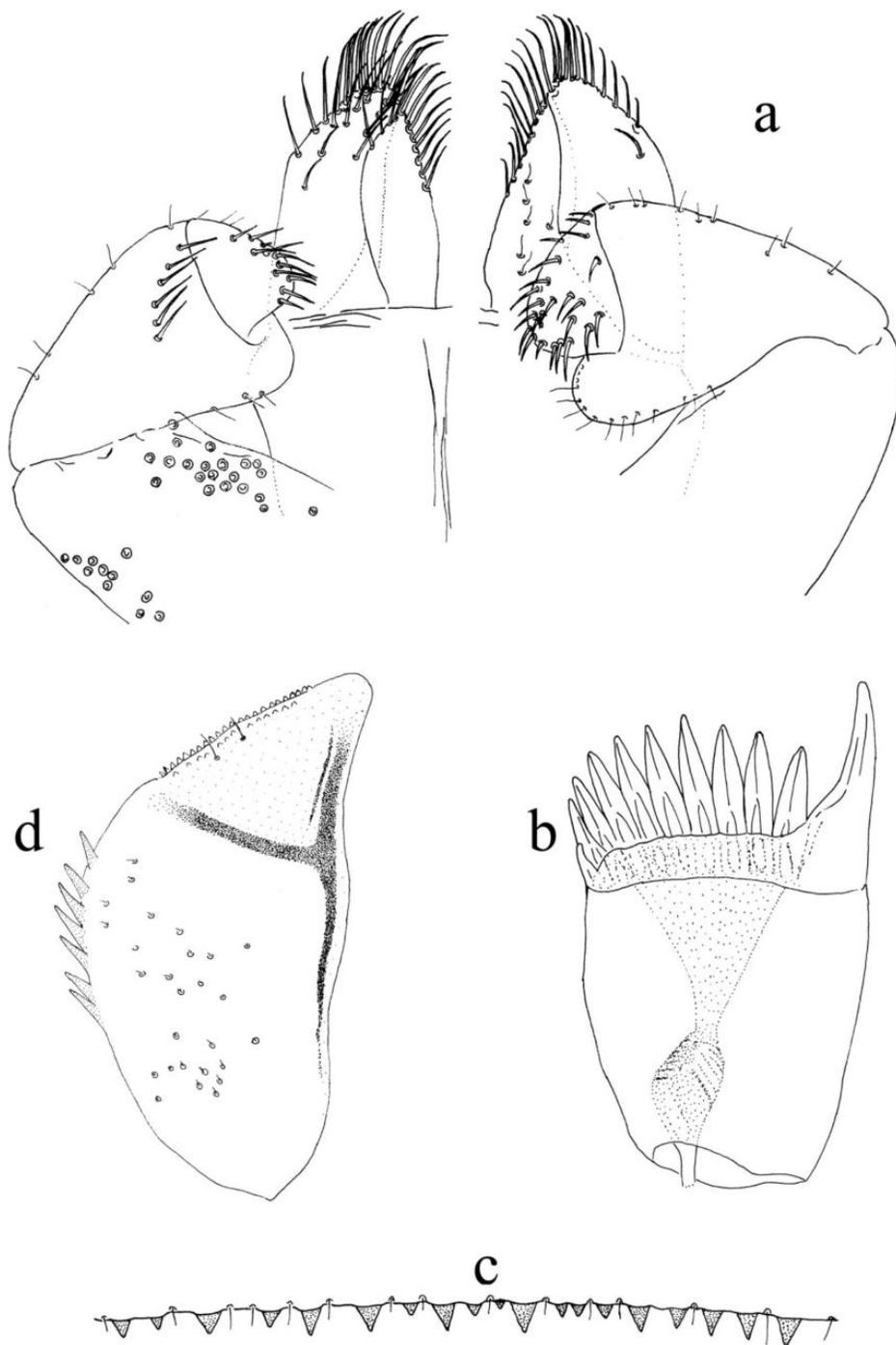
Cobertura	Definición	Ejemplo en imagen satelital
Zonas de extracción minera	Son áreas dedicadas a la extracción de materiales a cielo abierto.	
Zona urbana continua	Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada, que cubre más del 80% del terreno. Es un área densamente construida, donde se aprecia una trama gruesa que permite distinguir bien el tejido que forman las cuadras. la vegetación y el suelo desnudo, representan una baja proporción (menos del 20%) de la zona urbana.	
Zona urbana discontinua	Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada, que cubre más del 80% del terreno. Es un área densamente construida, donde se aprecia una trama gruesa que permite distinguir bien el tejido que forman las cuadras. la vegetación y el suelo desnudo, representan una baja proporción (menos del 20%) de la zona urbana.	

Anexo 3. Características diagnósticas de las especies *Camelobaetidius maidu*, *Camelobaetidius variabilis*, *Camelobaetidius kondratieffi*, y *Camelobaetidius shepardii*.



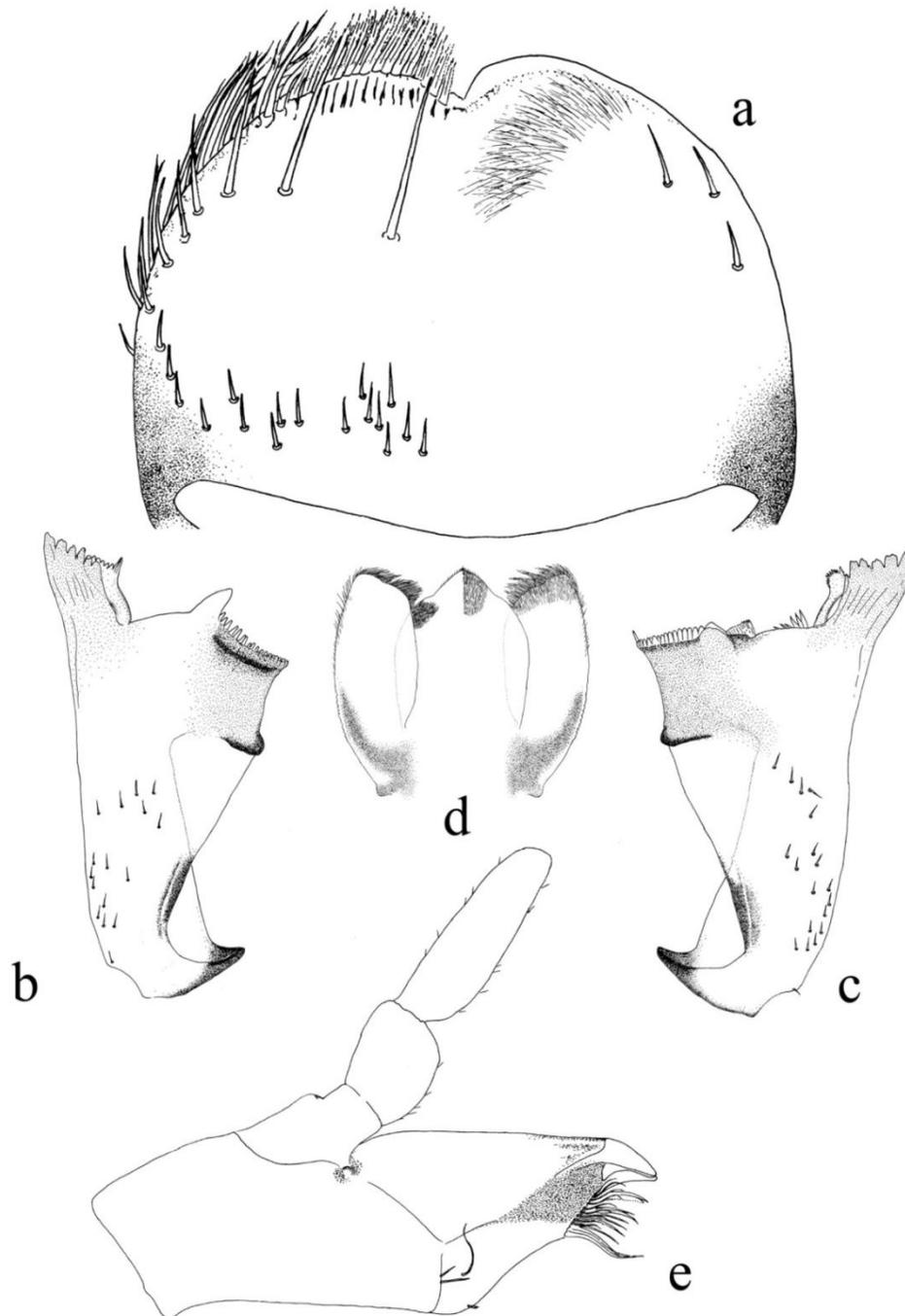
Anexo 3.1. *Camelobaetidius maidu* Jacobus & McCafferty 2005, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.

Fuente: Elaboración propia



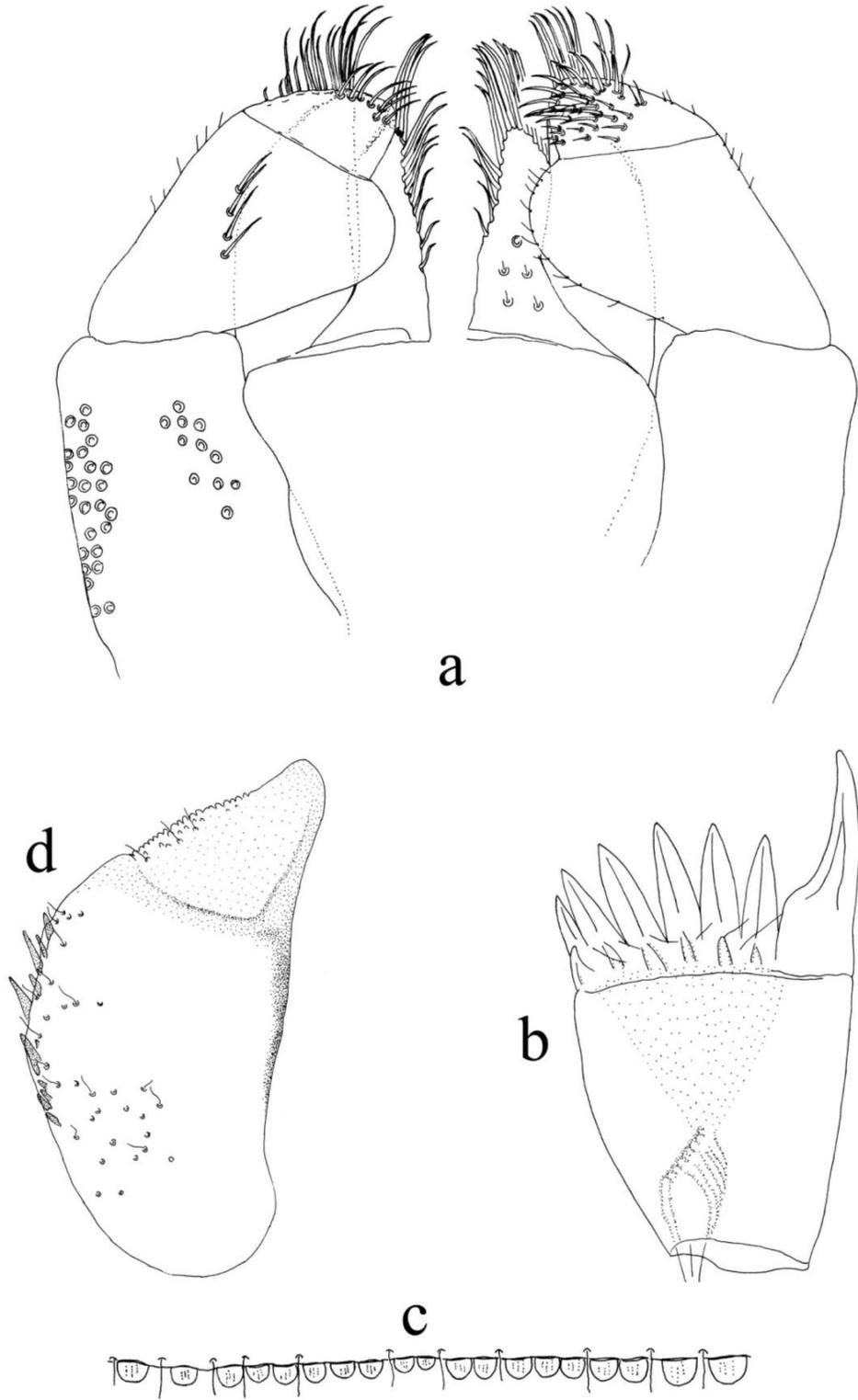
Anexo 3.2. *Camelobaetidius maidu* Jacobus & McCafferty 2005, ninfa. a) labio (izquierda v. d., derecha v. v.), b) uñas, c) espinas del IV tergo abdominal, d) paraprocto.

Fuente: Elaboración propia



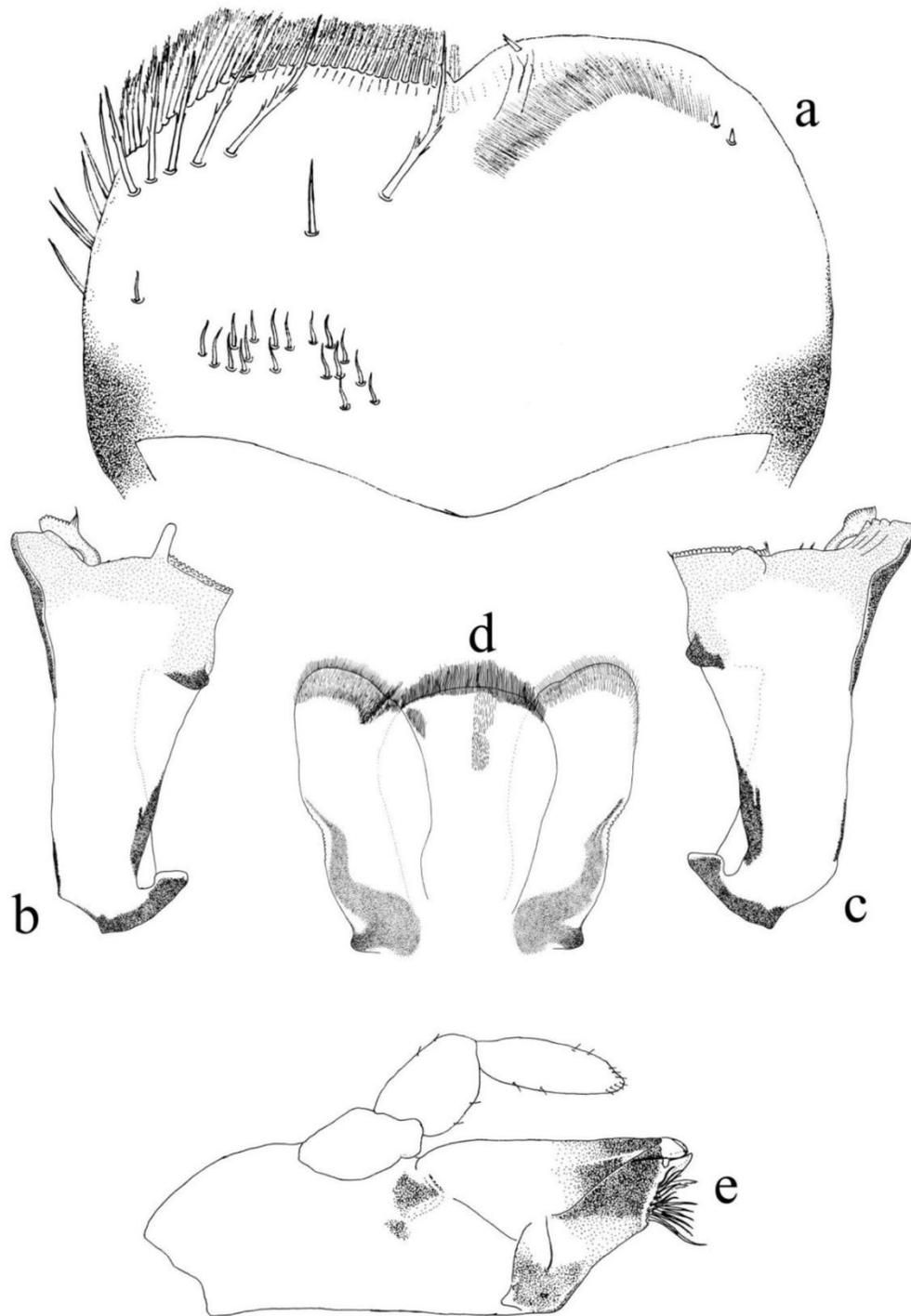
Anexo 3.3. *Camelobaetidius variabilis* Wiersema 1998, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.

Fuente: Elaboración propia



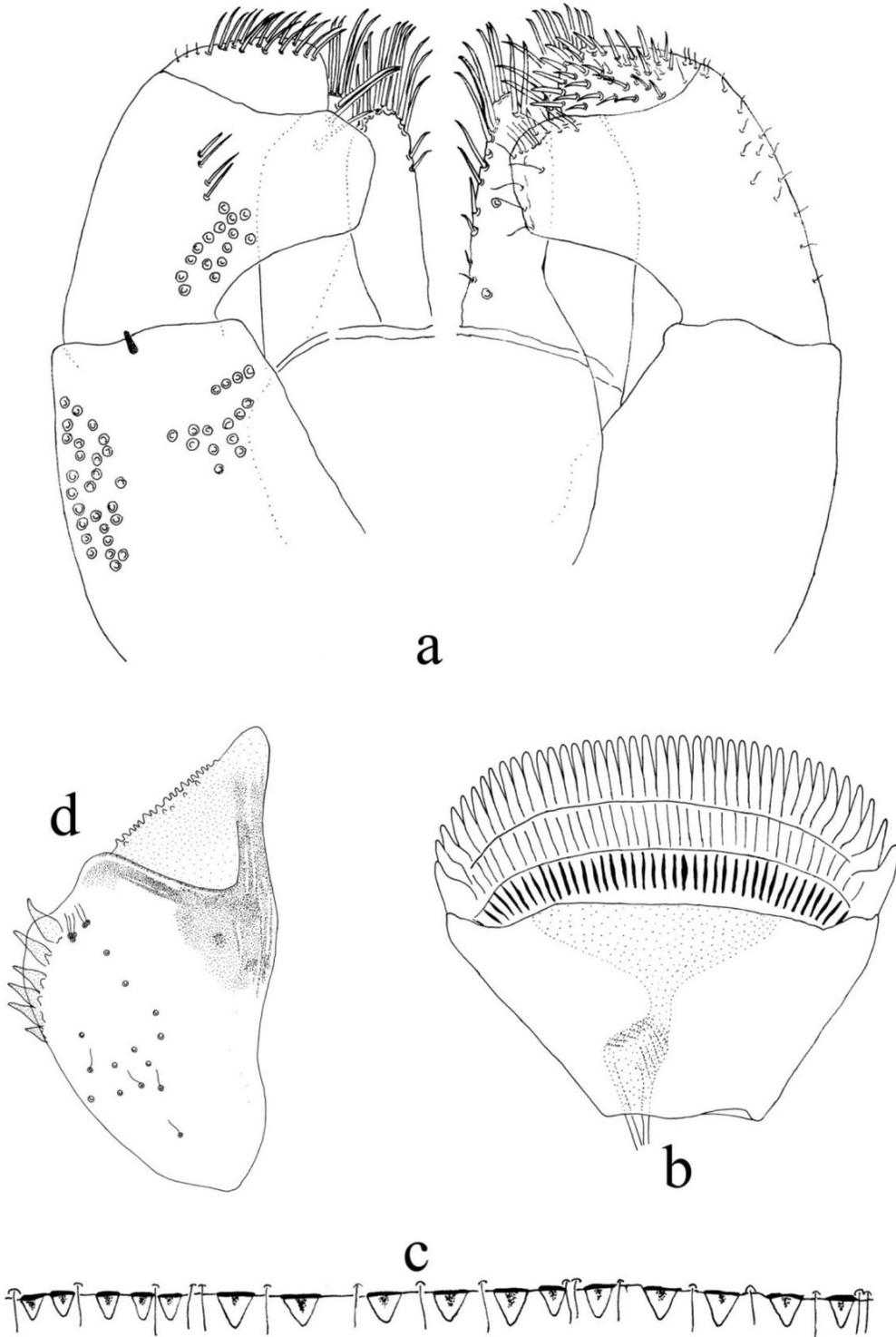
Anexo 3.4. *Camelobaetidius variabilis* Wiersema 1998, ninfa. a) labio (izquierda v. d., derecha v. v.), b) uñas, c) espinas del IV tergo abdominal, d) paraprocto.

Fuente: Elaboración propia



Anexo 3.5. *Camelobaetidius kondratieffi* Lugo-Ortiz & McCafferty 1995, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.

Fuente: Elaboración propia



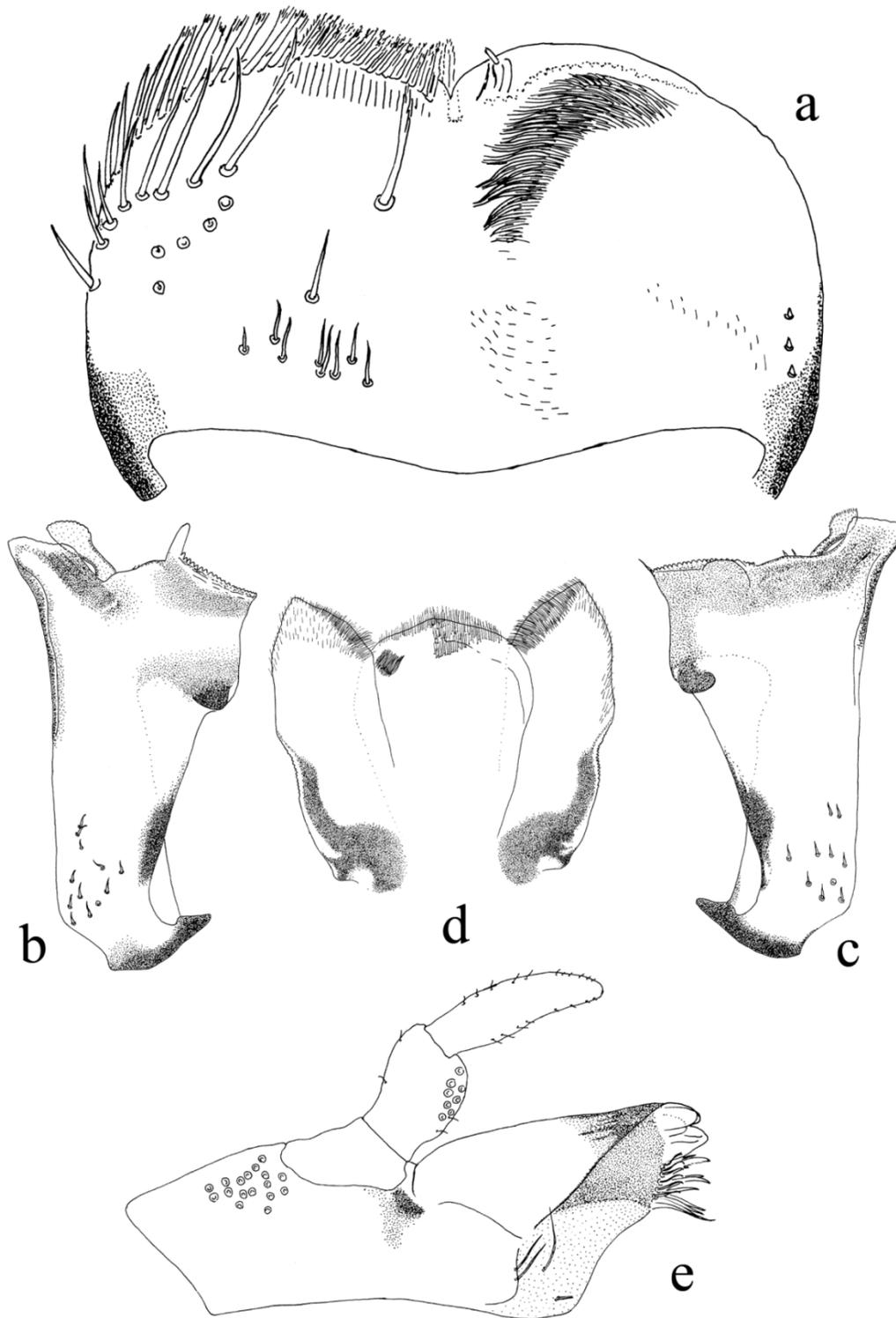
Anexo 3.6. *Camelobaetidius kondratieffi* Lugo-Ortiz & McCafferty 1995, ninfa. a) labio (izquierda v. d., derecha v. v.), b) uñas, c) espinas del IV tergo abdominal, d) paraprocto.

Fuente: Elaboración propia



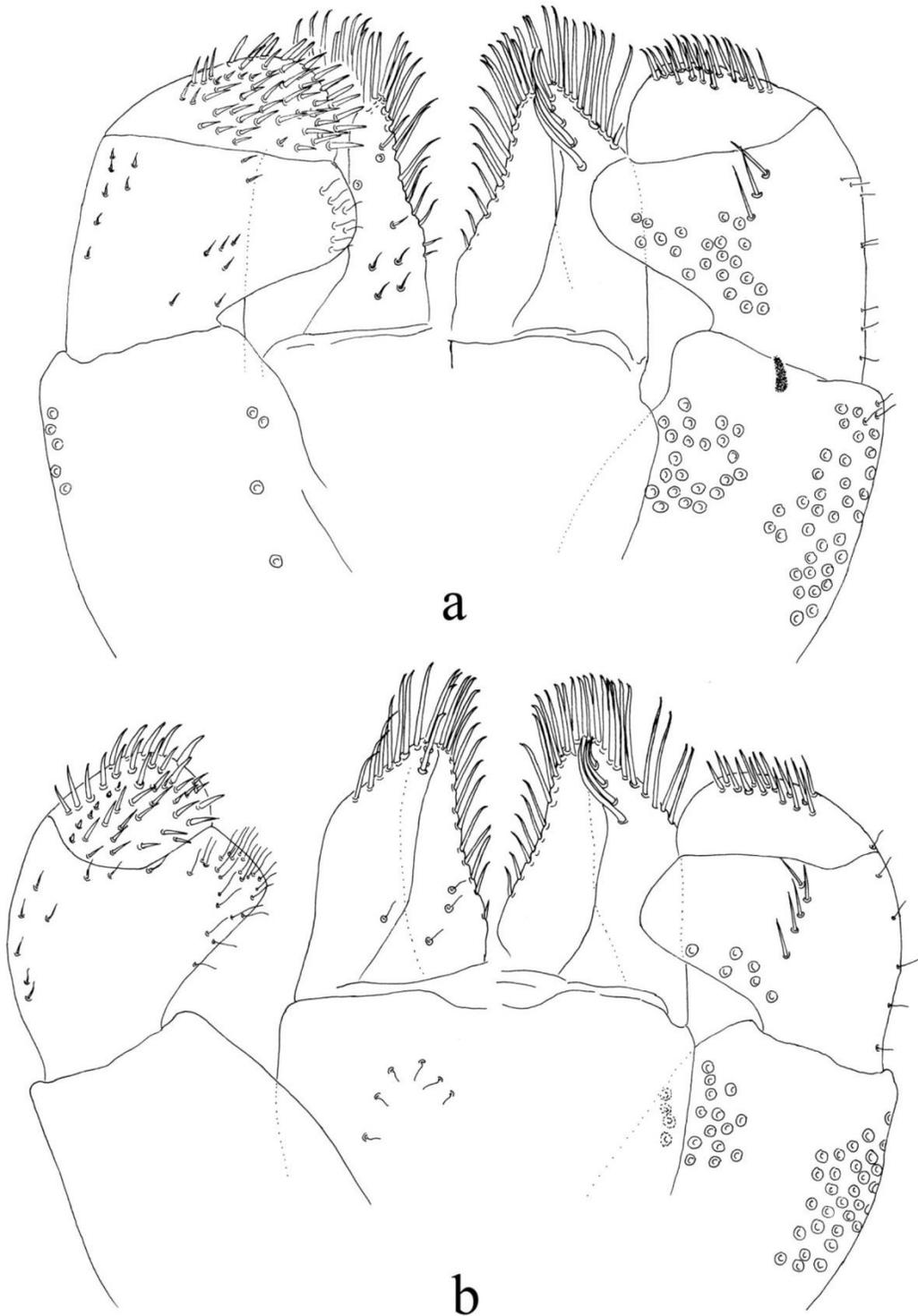
**Anexo 3.7. *Camelobaetidius shepardi* Randolph & McCafferty 2001, ninfas.
Coloración, A-B) machos, C) hembra.**

Fuente: Elaboración propia



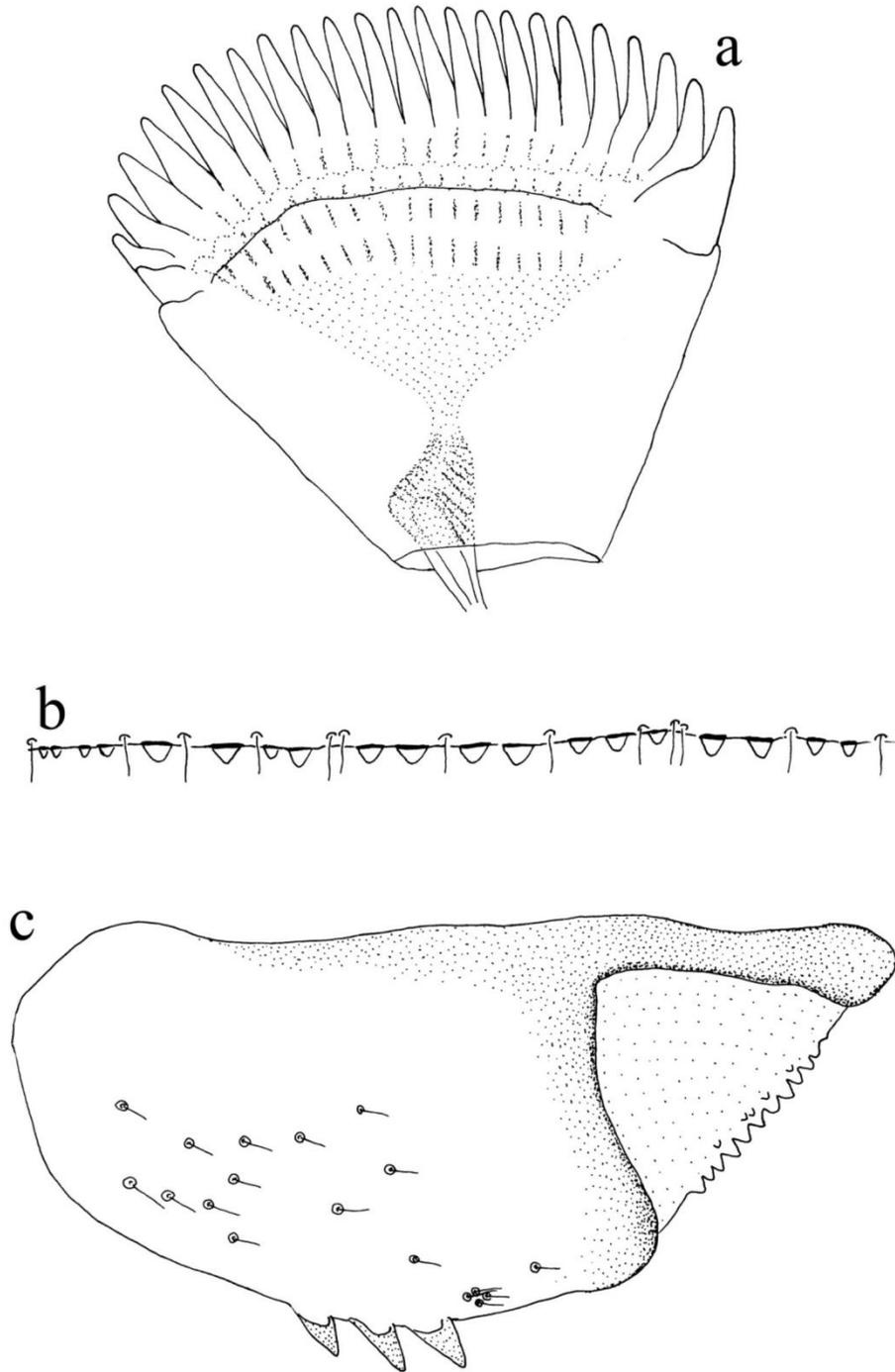
Anexo 3.8. *Camelobaetidius shepardi* Randolph & McCafferty 2001, ninfa. a) labro (izquierda v. d., derecha v. v.), b) mandíbula izquierda, c) mandíbula derecha, d) hipofaringe (izquierda v. d., derecha v. v.), e) maxila.

Fuente: Elaboración propia



Anexo 3.9. *Camelobaetidius shepardi* Randolph & McCafferty 2001, ninfa. labio (izquierda v. d., derecha v. v.), a) hembra, b) macho.

Fuente: Elaboración propia



Anexo 3.10. *Camelobaetidius shepardi* Randolph & McCafferty 2001, ninfa. a) uñas, b) espinas del IV tergo abdominal, c) paraprocto.

Fuente: Elaboración propia

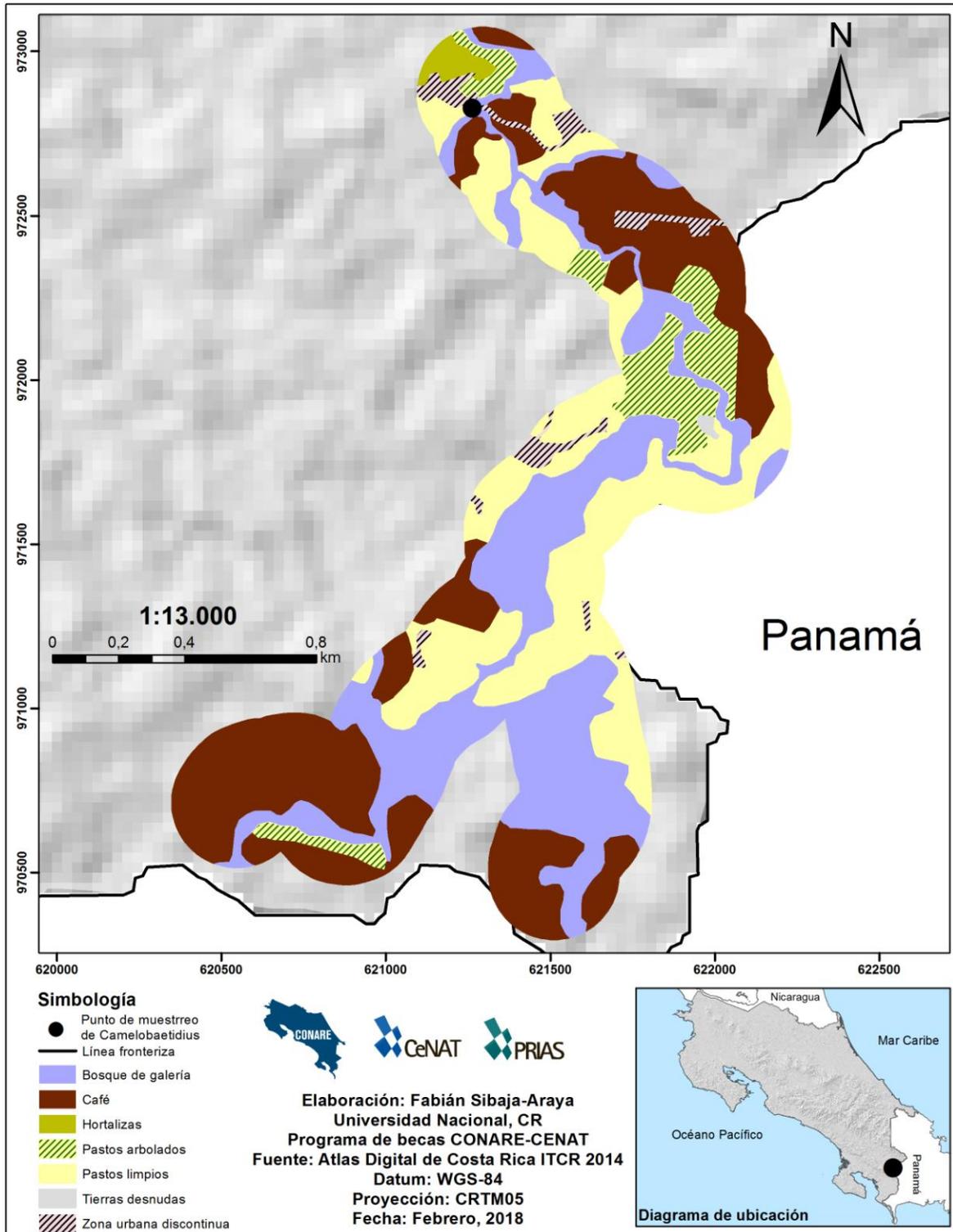
Anexo 4. Porcentaje de validación para cada uno de las Zonas de Influencia digitalizadas.

Quebrada/Río	% validación (error 10%)
Sombrero	100
Segunda	100
Blanco	100
Negra	100
Tortuga	96
Porrosatí	95
Tambor	92
Tibas	92
Seca	92
Cañas	92
Peje	92
Ángel	91
Torito	90
Colima	90
Guacimal	89

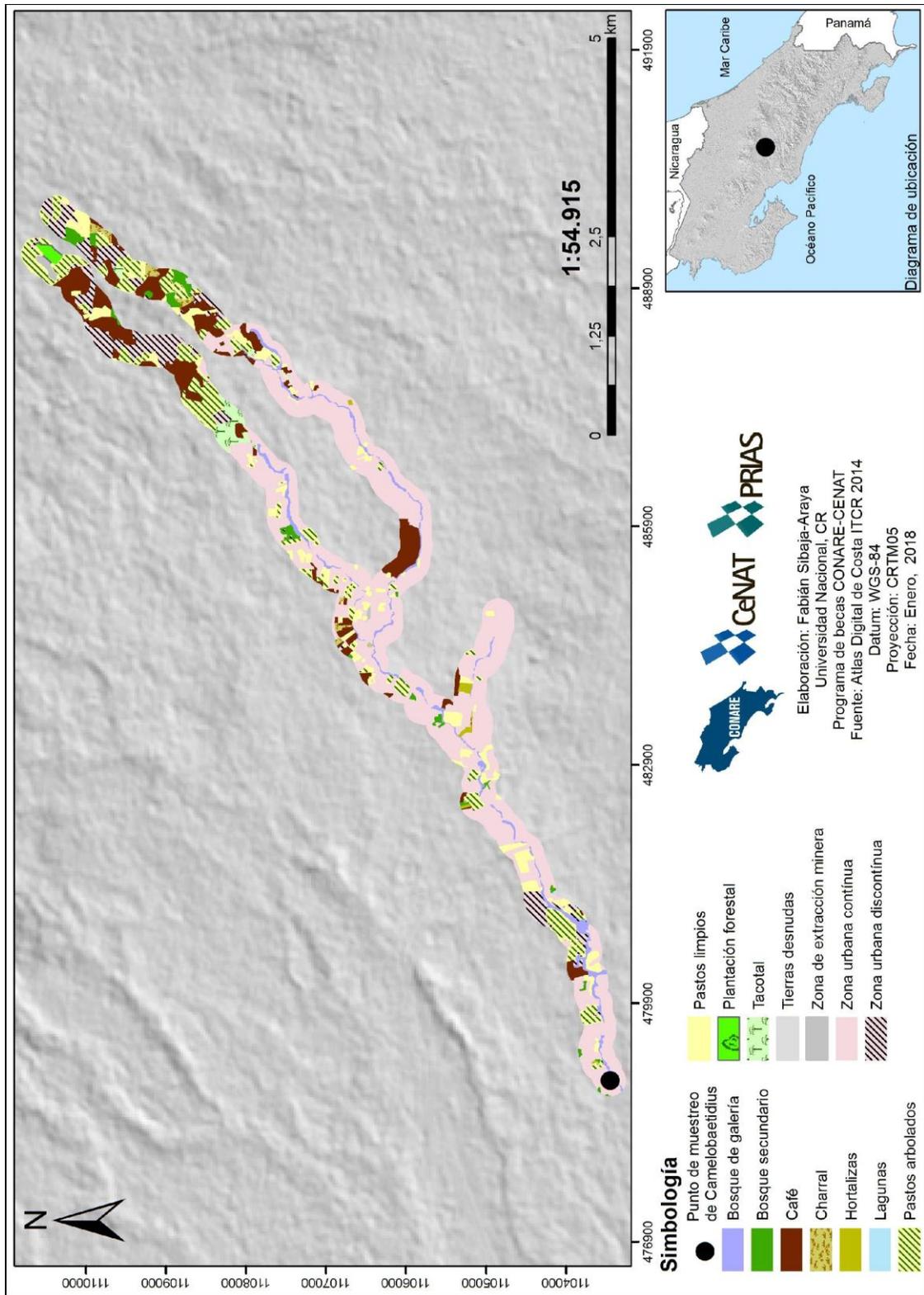
Quebrada/Río	% validación (error 10%)
San Rafael	89
Borbón	85
Claro	85
San Luis	84
Atirro	83
Ciruelas	83
Bonilla	81
Jiménez	81
Manigordo	80
Poza Azul	80
Playa Hermosa	80
Aquiaries	80
Chirripó	80

Fuente: Elaboración propia

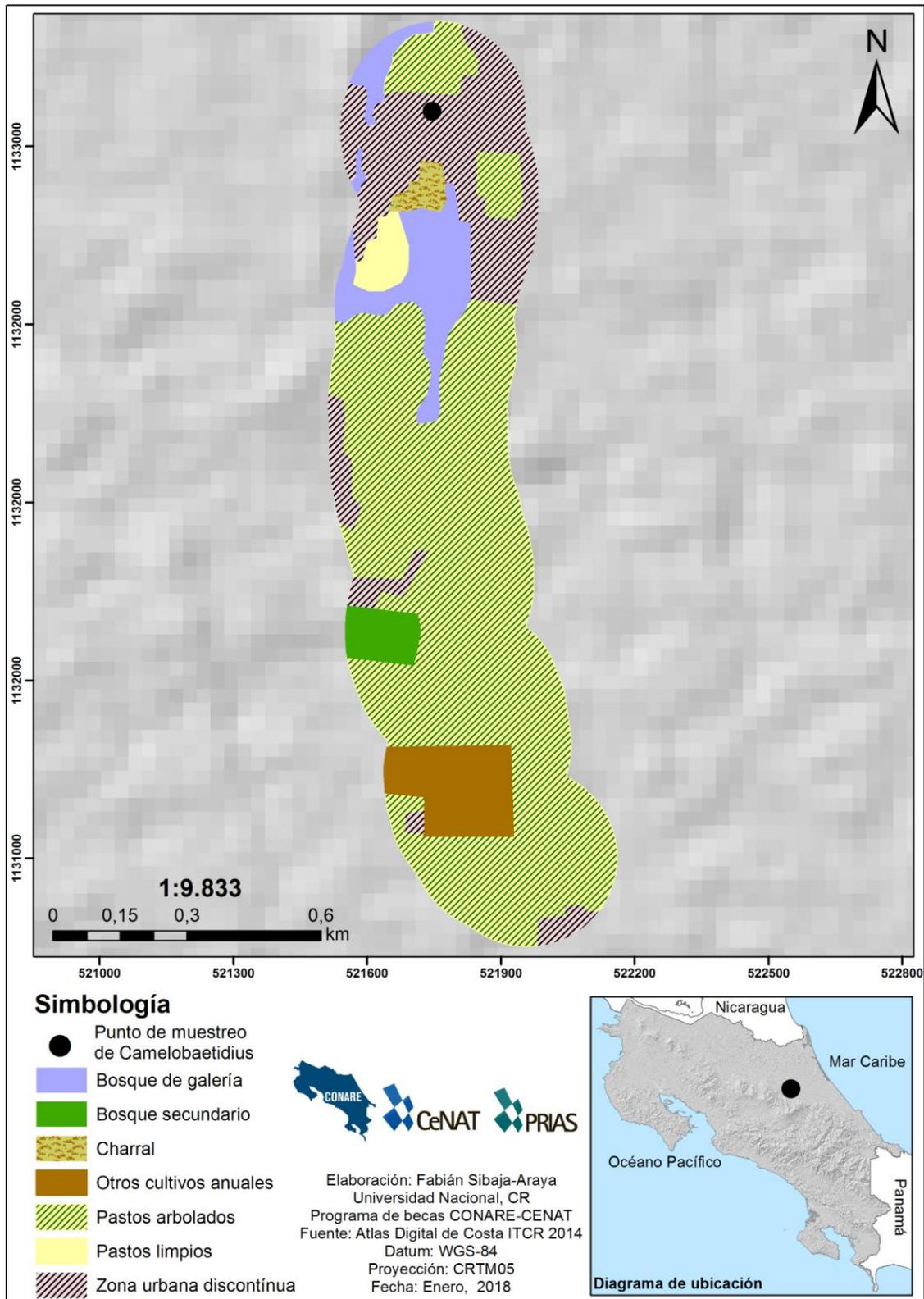
Anexo 5. Mapas de coberturas de uso de la tierra para los 28 sitios de muestreo



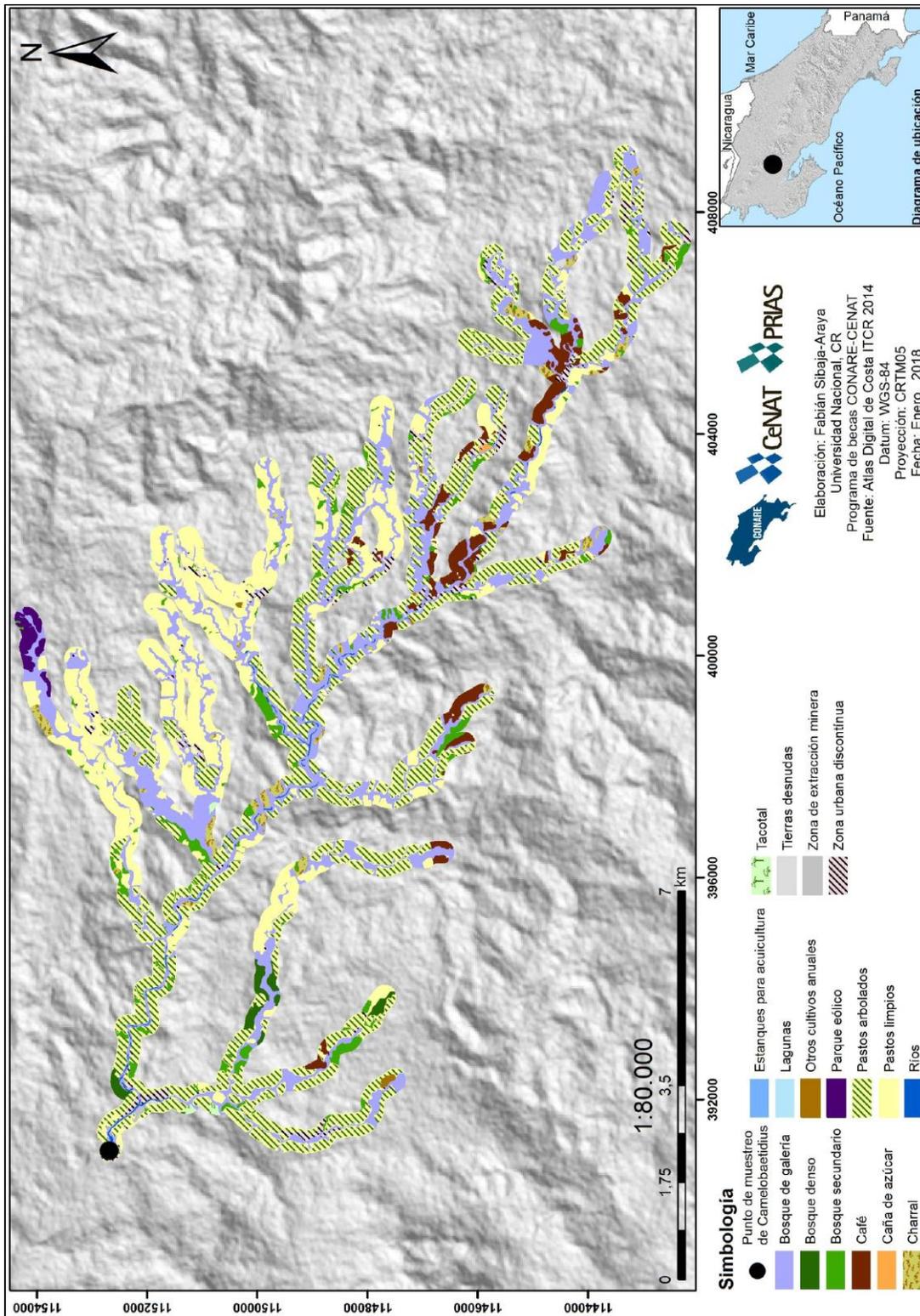
Anexo 5.1. Zona de influencia para Quebrada Borbón



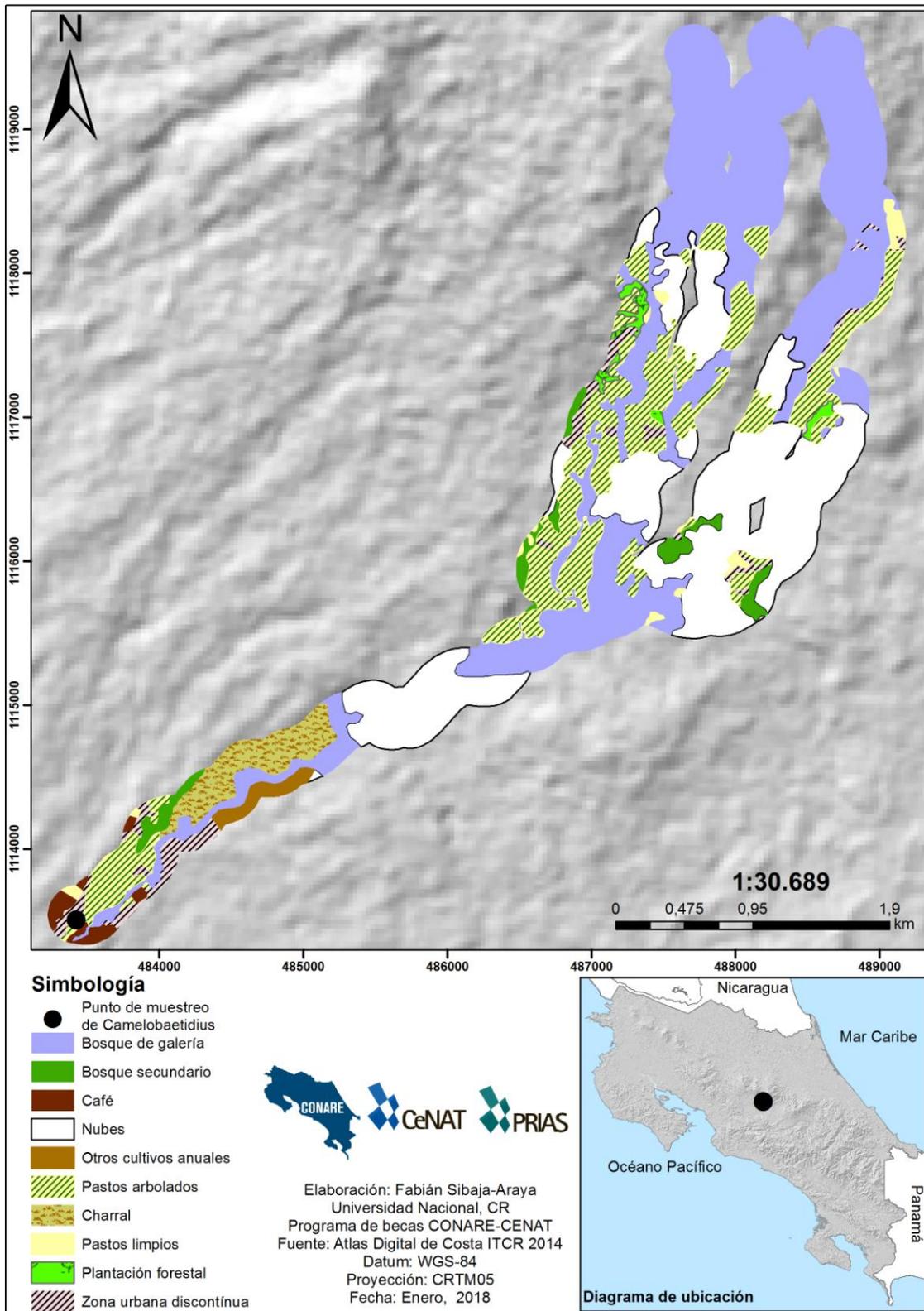
Anexo 5.2. Zona de influencia para Quebrada Seca



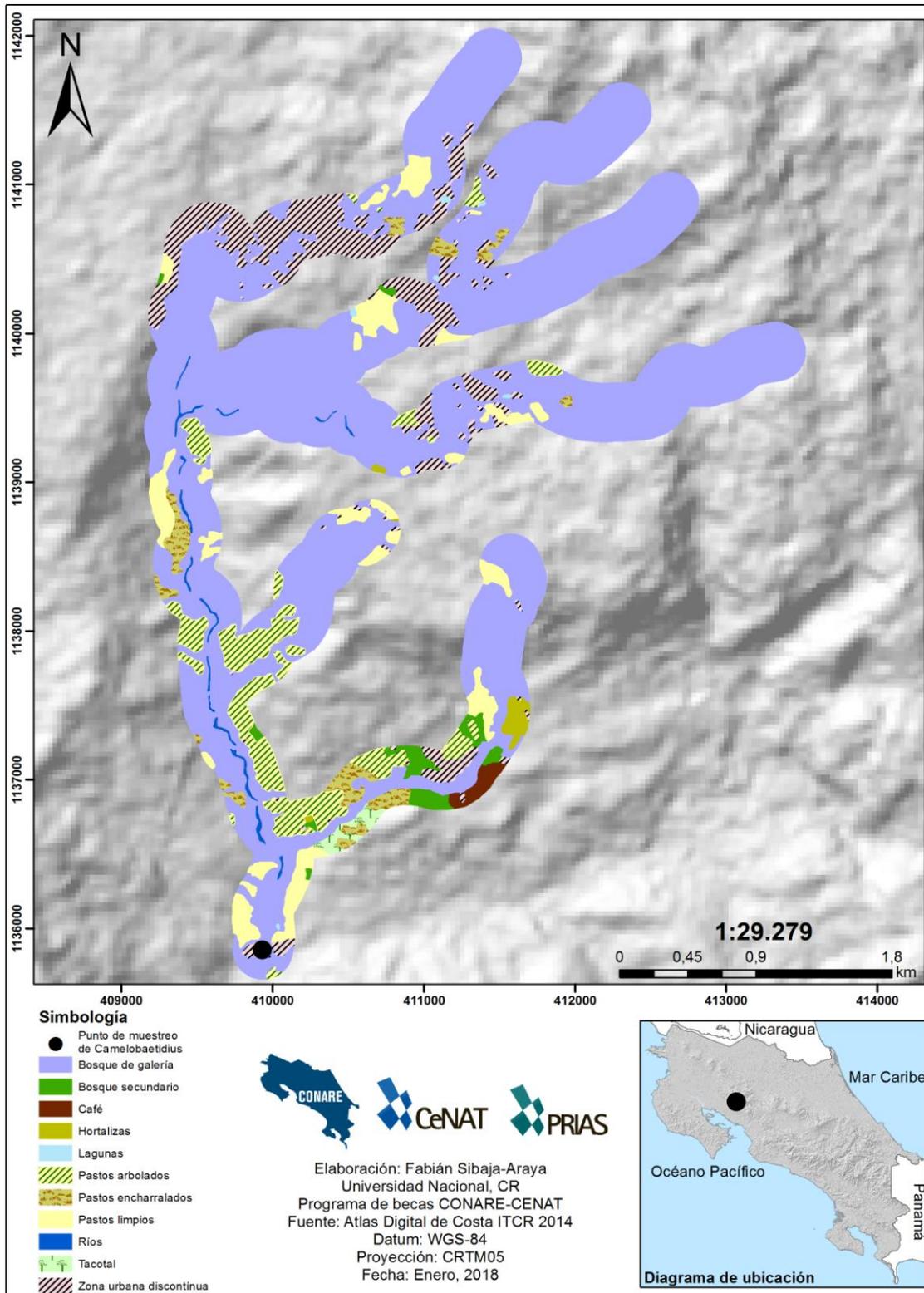
Anexo 5.3. Zona de influencia para Quebrada Tortuga



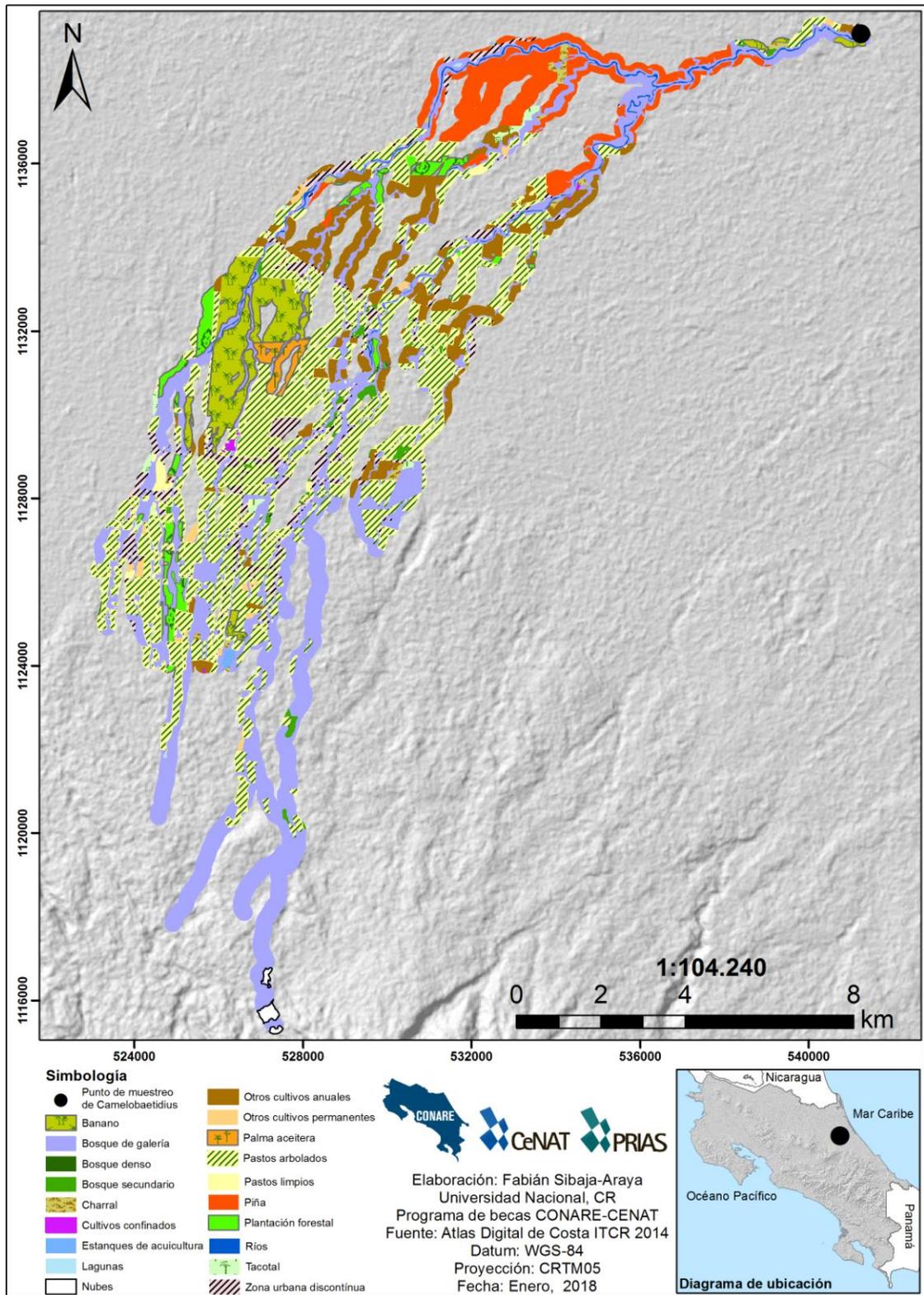
Anexo 5.4. Zona de influencia para Río Cañas



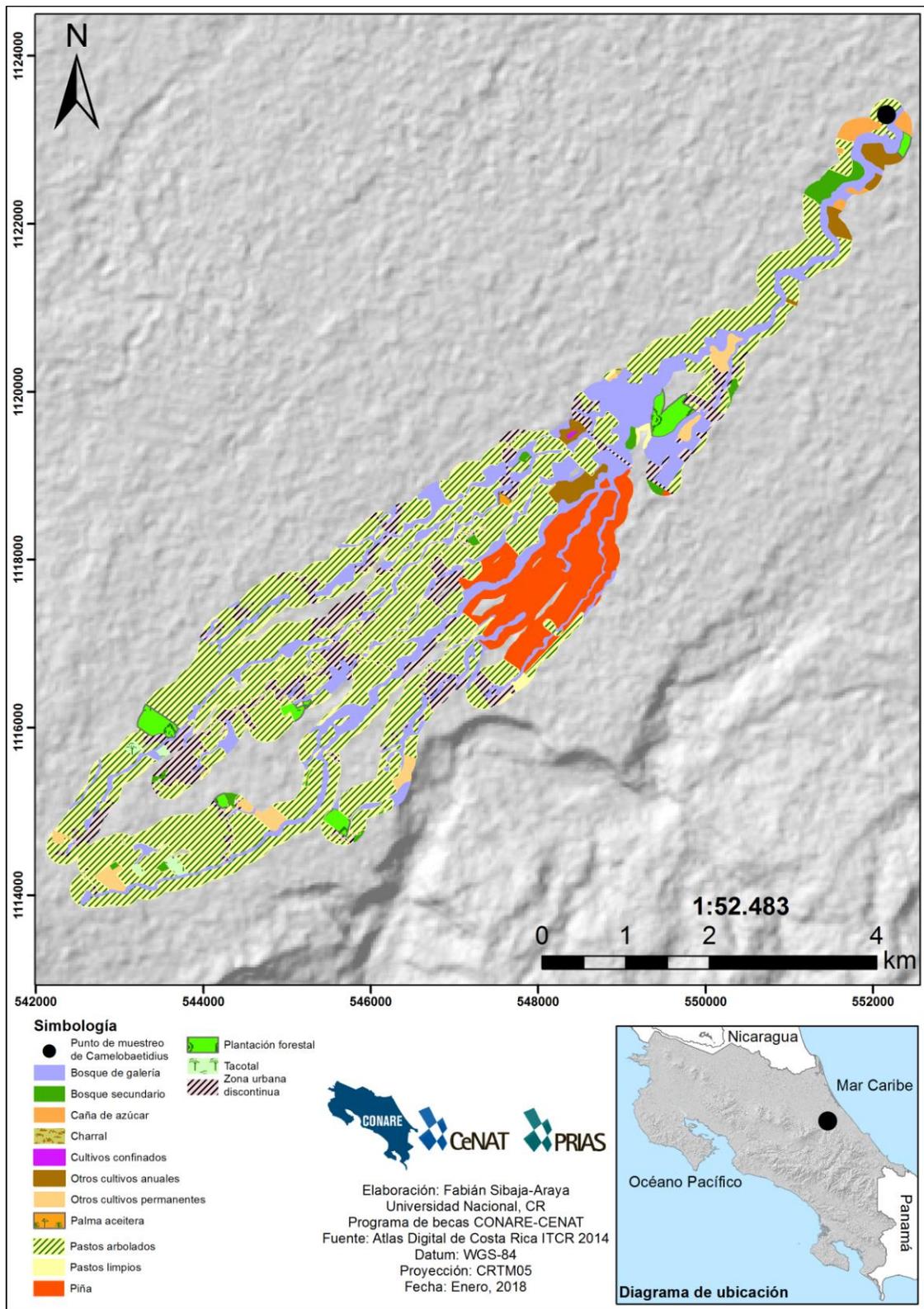
Anexo 5.5. Zona de influencia para Río Ciruelas



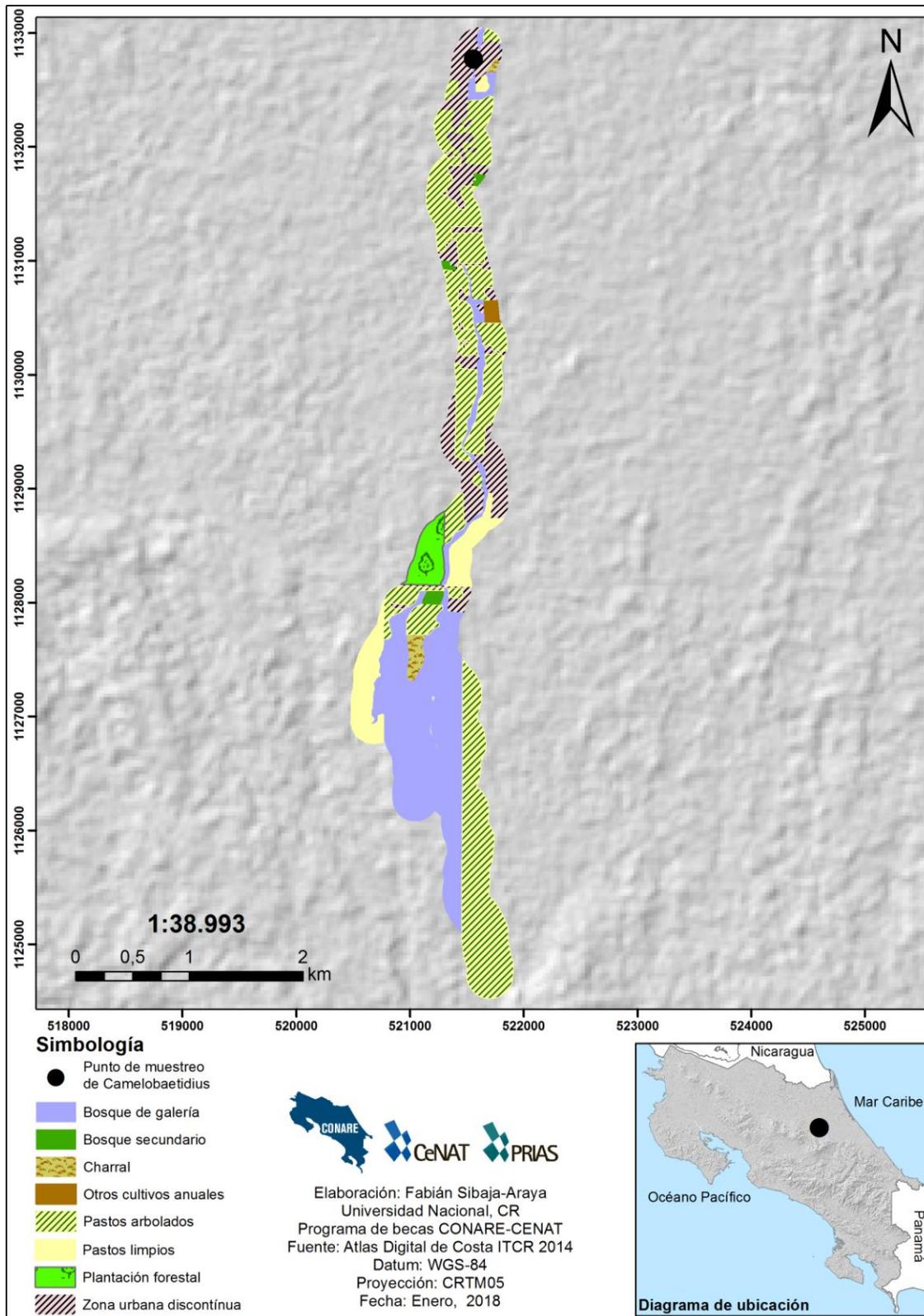
Anexo 5.6. Zona de influencia para Río Guacimal



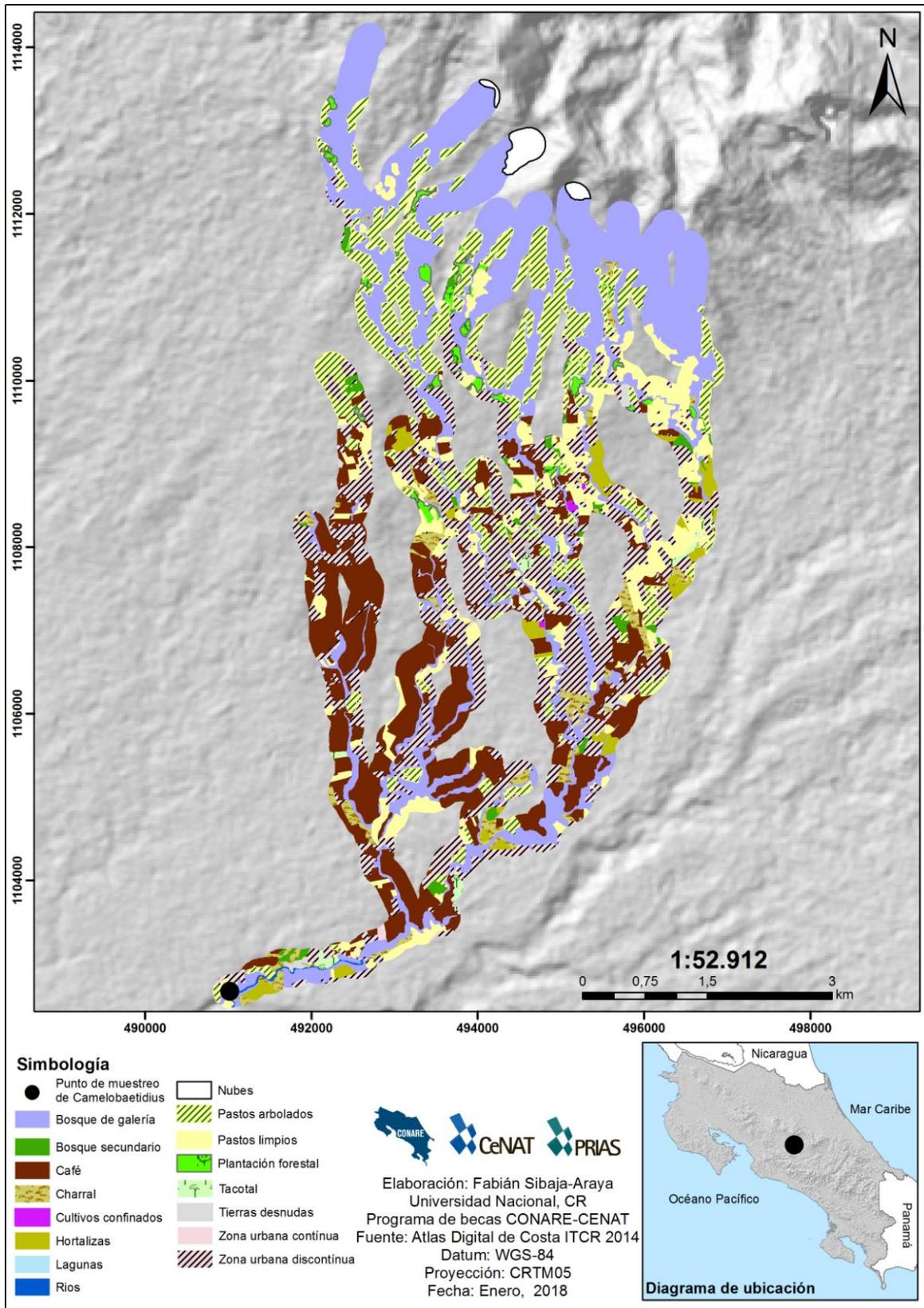
Anexo 5.7. Zona de influencia para Río Jiménez



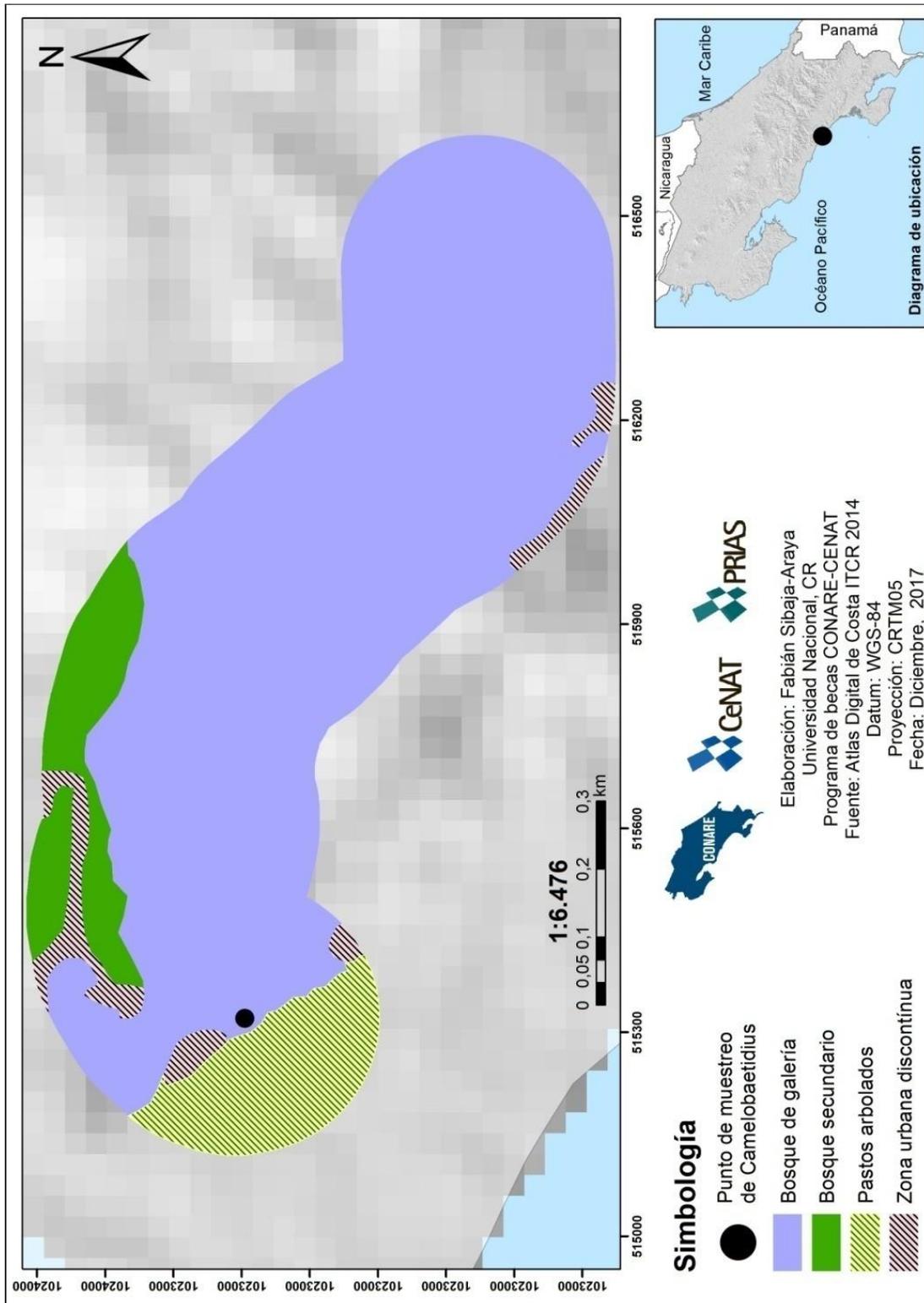
Anexo 5.8. Zona de influencia para Río Peje



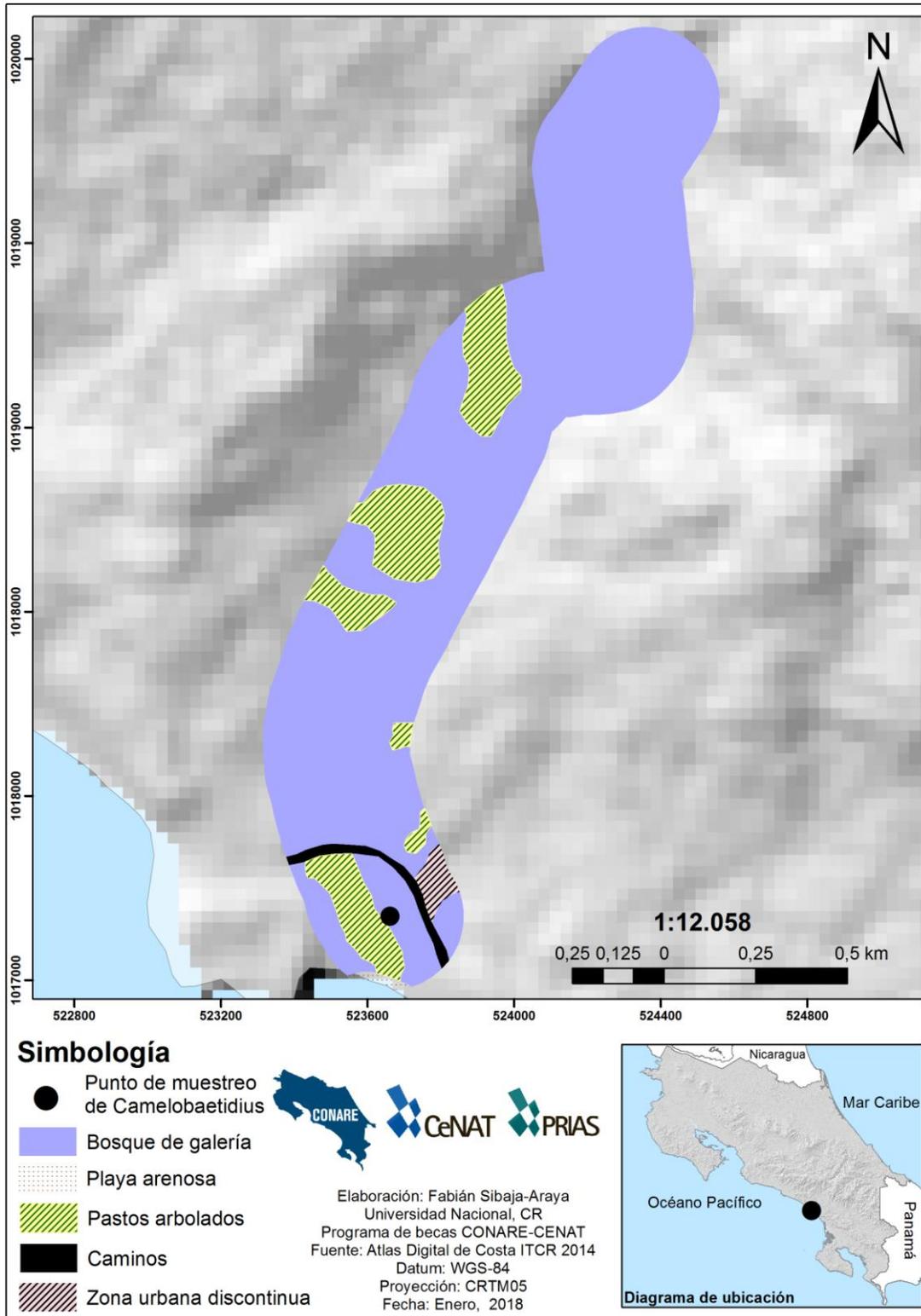
Anexo 5.9. Zona de influencia para Río San Rafael



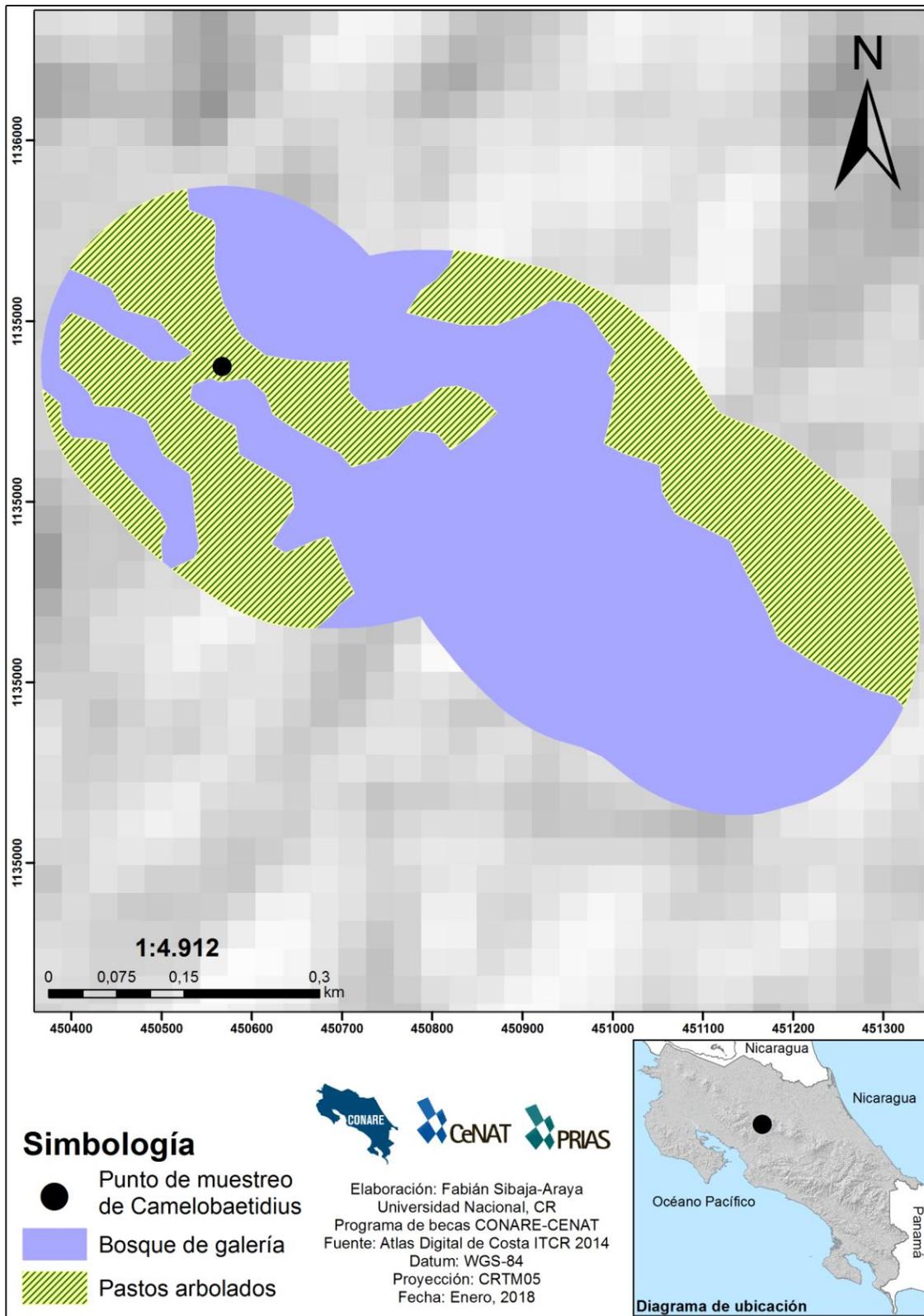
Anexo 5.10. Zona de influencia para Río Tibás



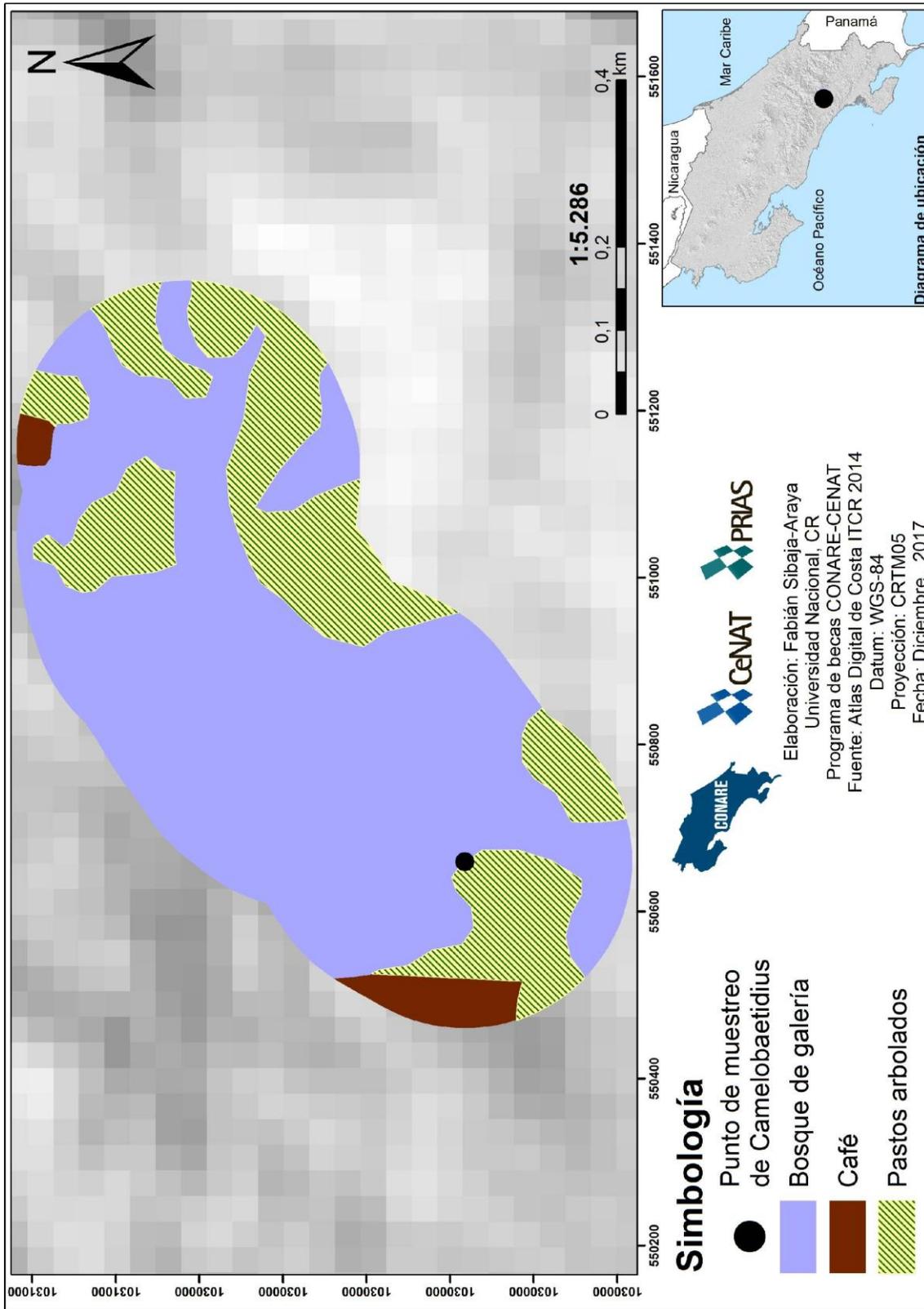
Anexo 5.11. Zona de influencia para Quebrada Poza Azul



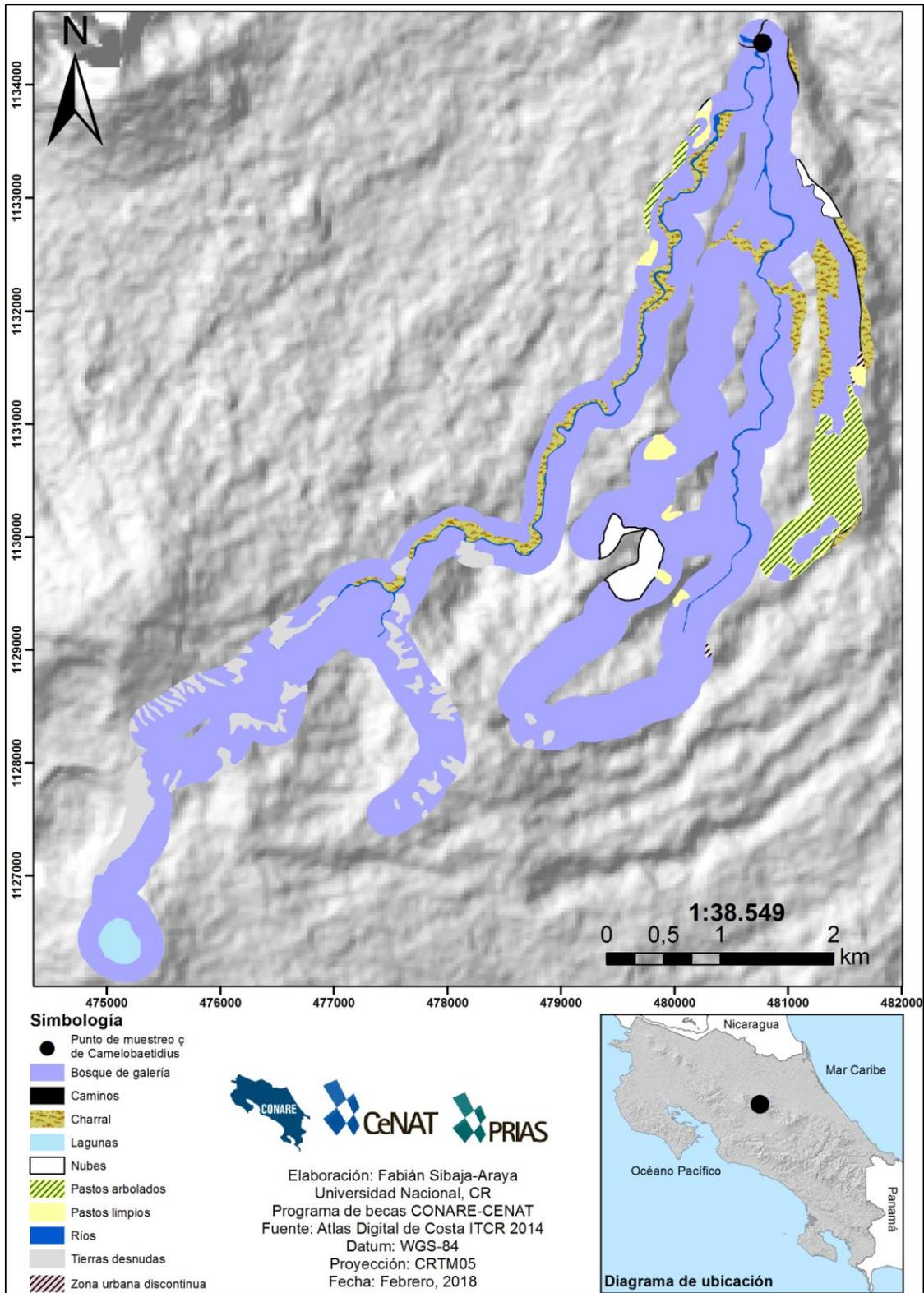
Anexo 5.12. Zona de influencia para Quebrada Playa Hermosa



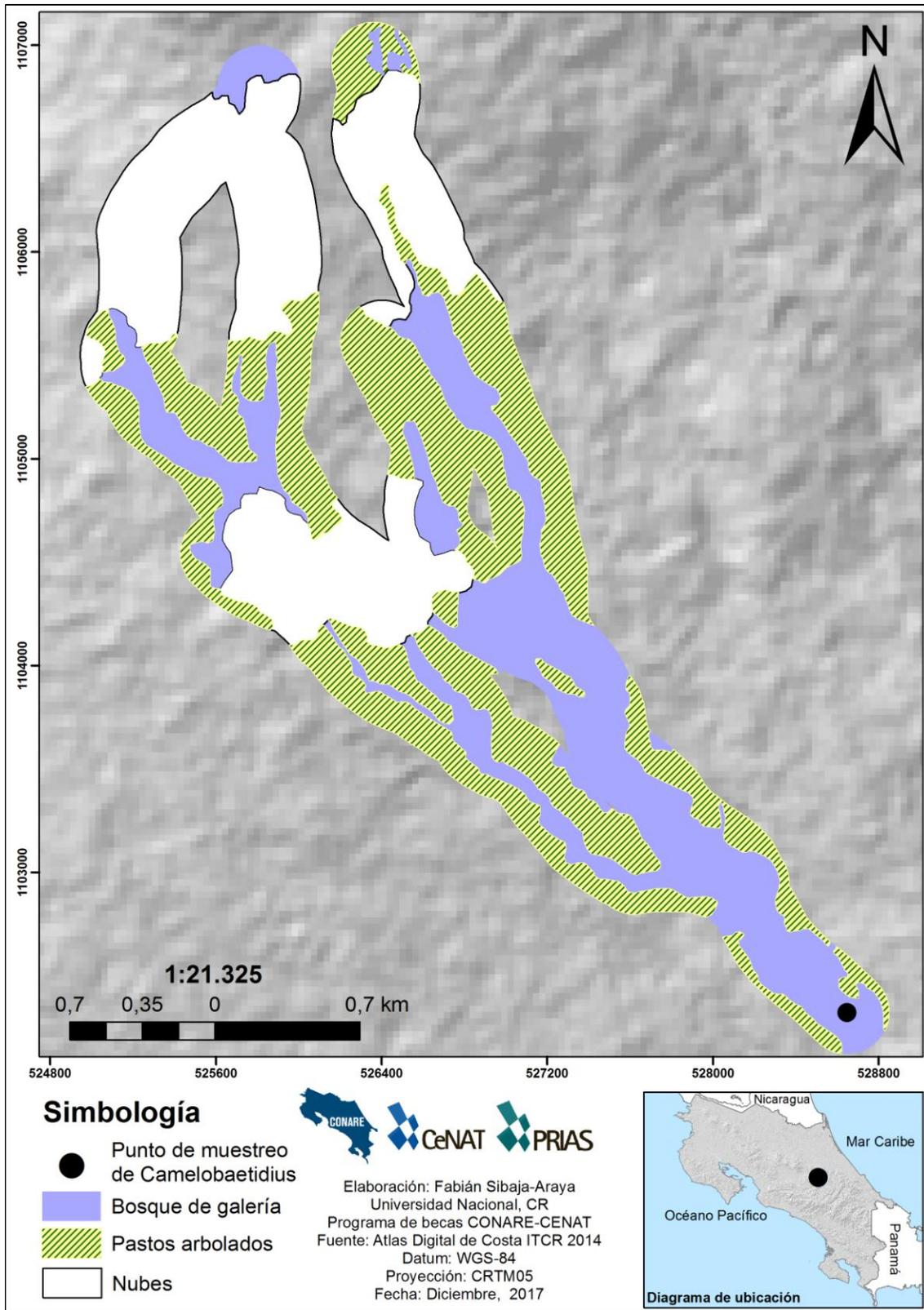
Anexo 5.13. Zona de influencia para Quebrada Segunda



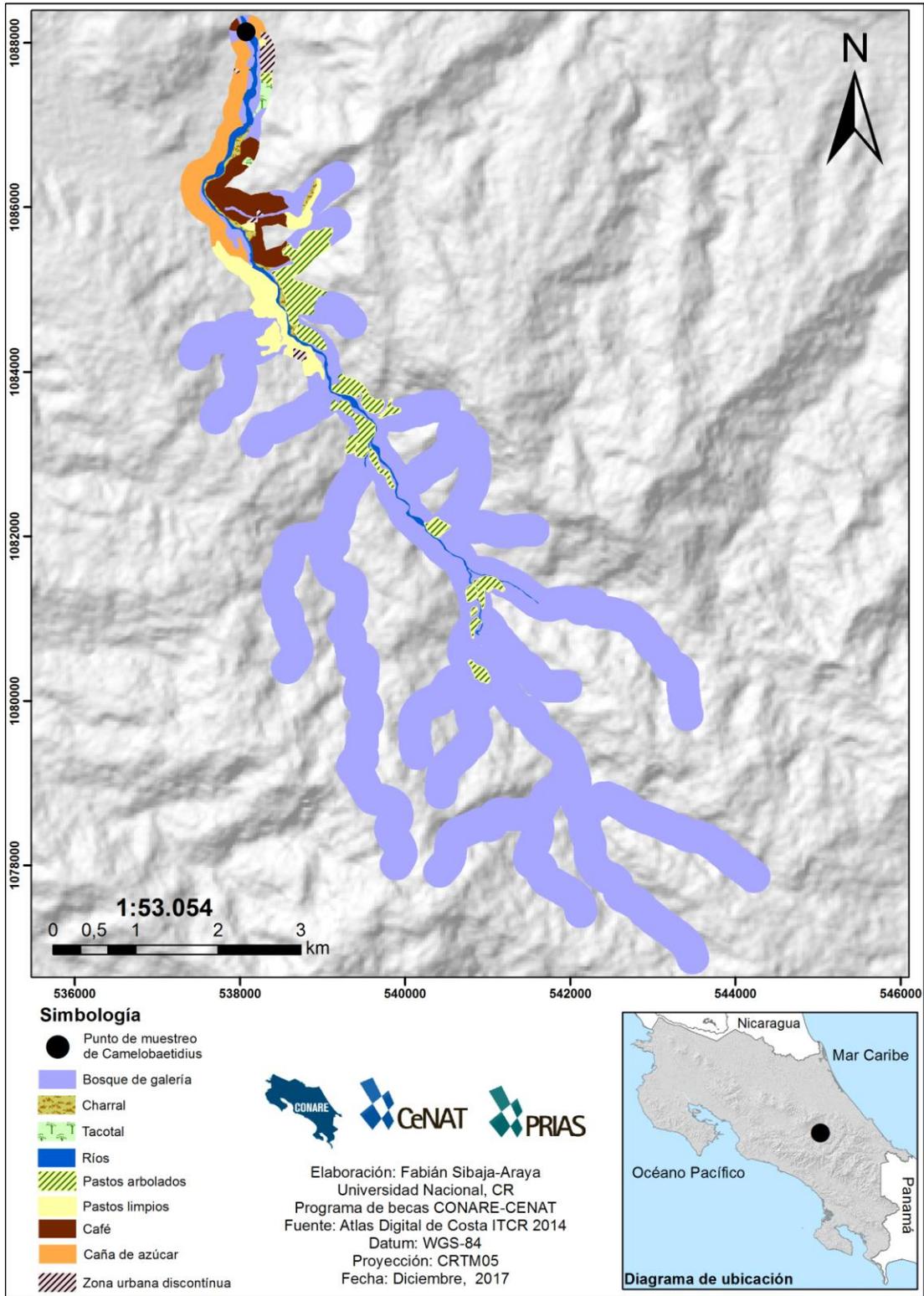
Anexo 5.14. Zona de influencia para Quebrada Tambor



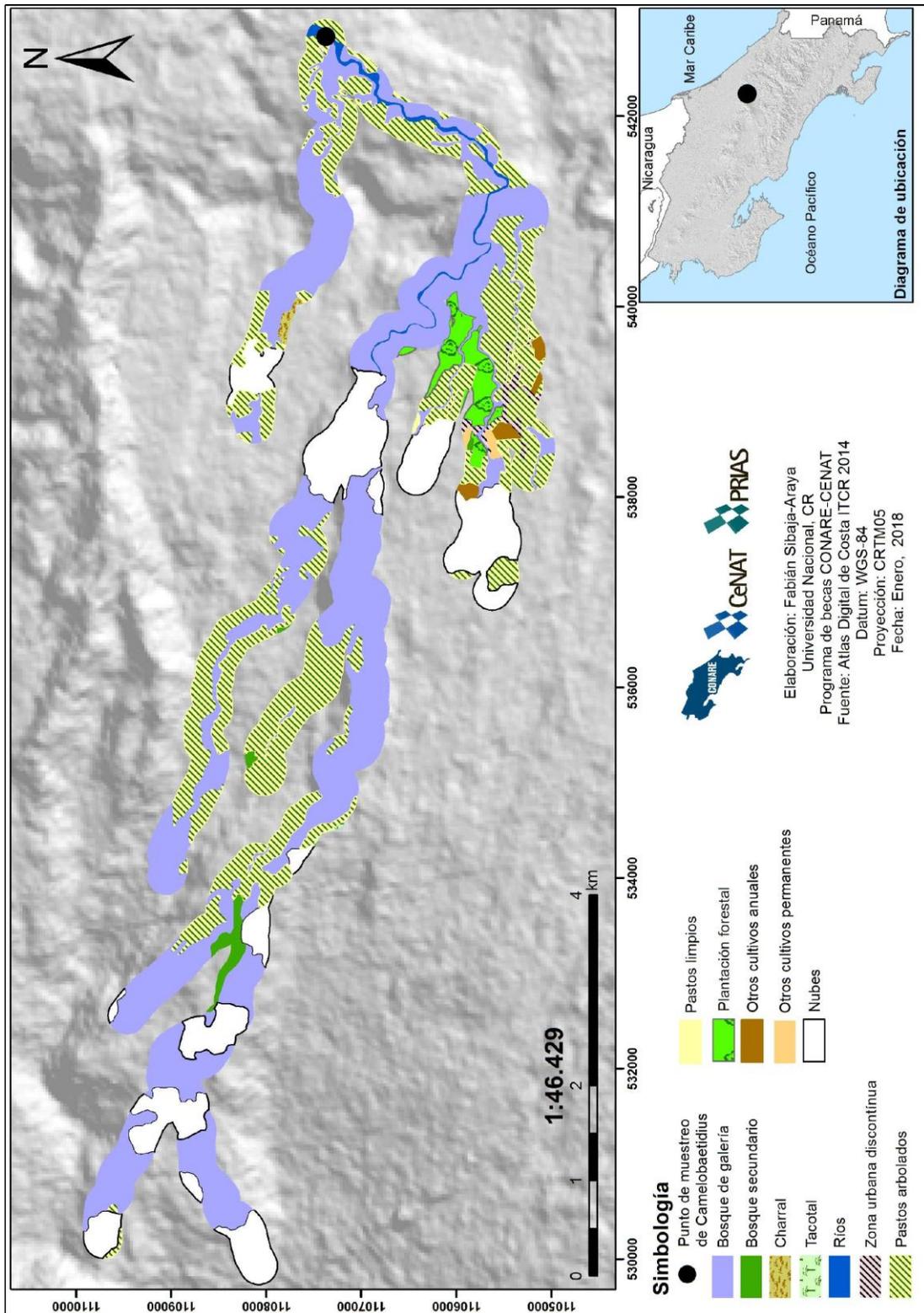
Anexo 5.15. Zona de influencia para Río Ángel



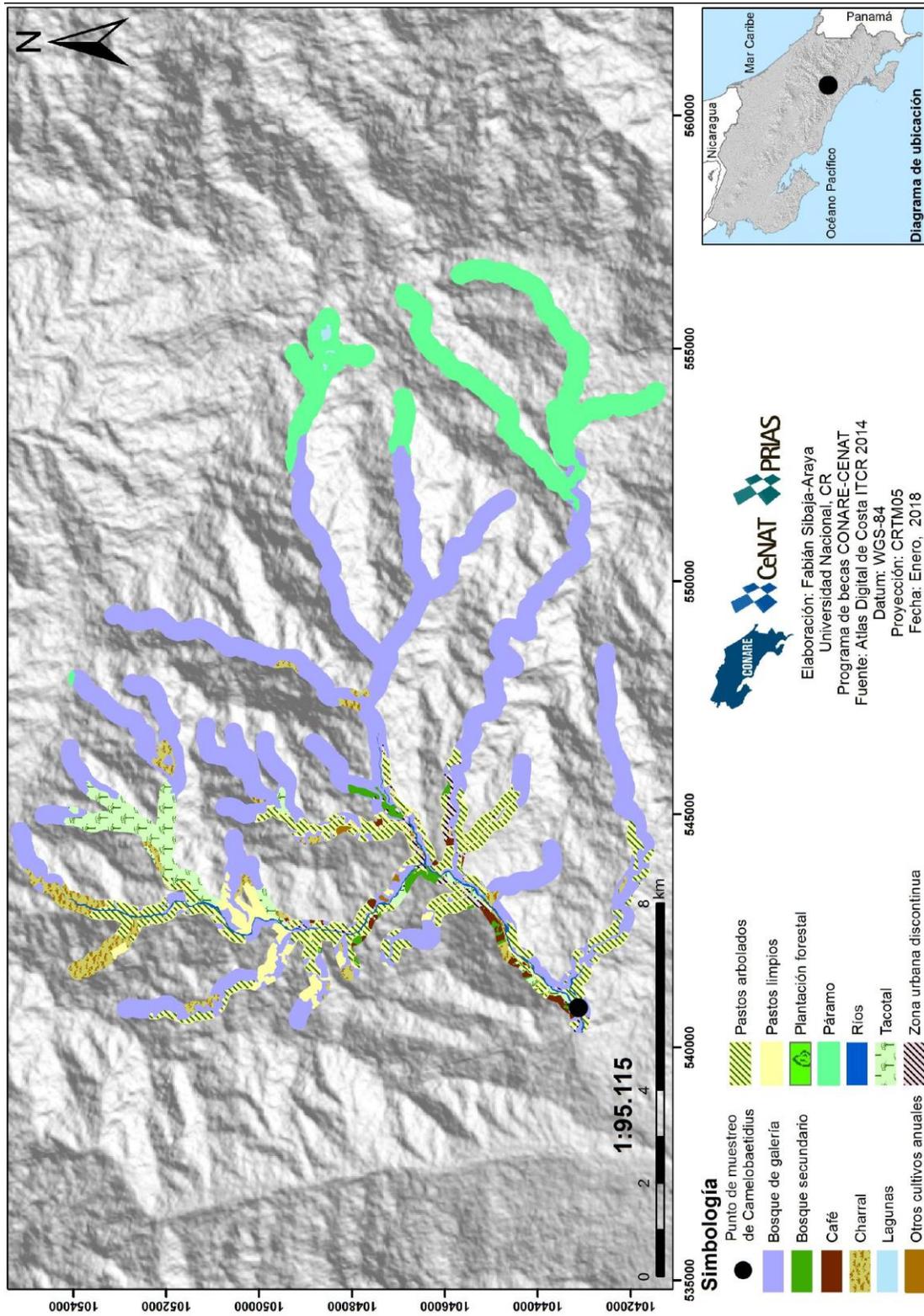
Anexo 5.16. Zona de influencia para Río Aquire



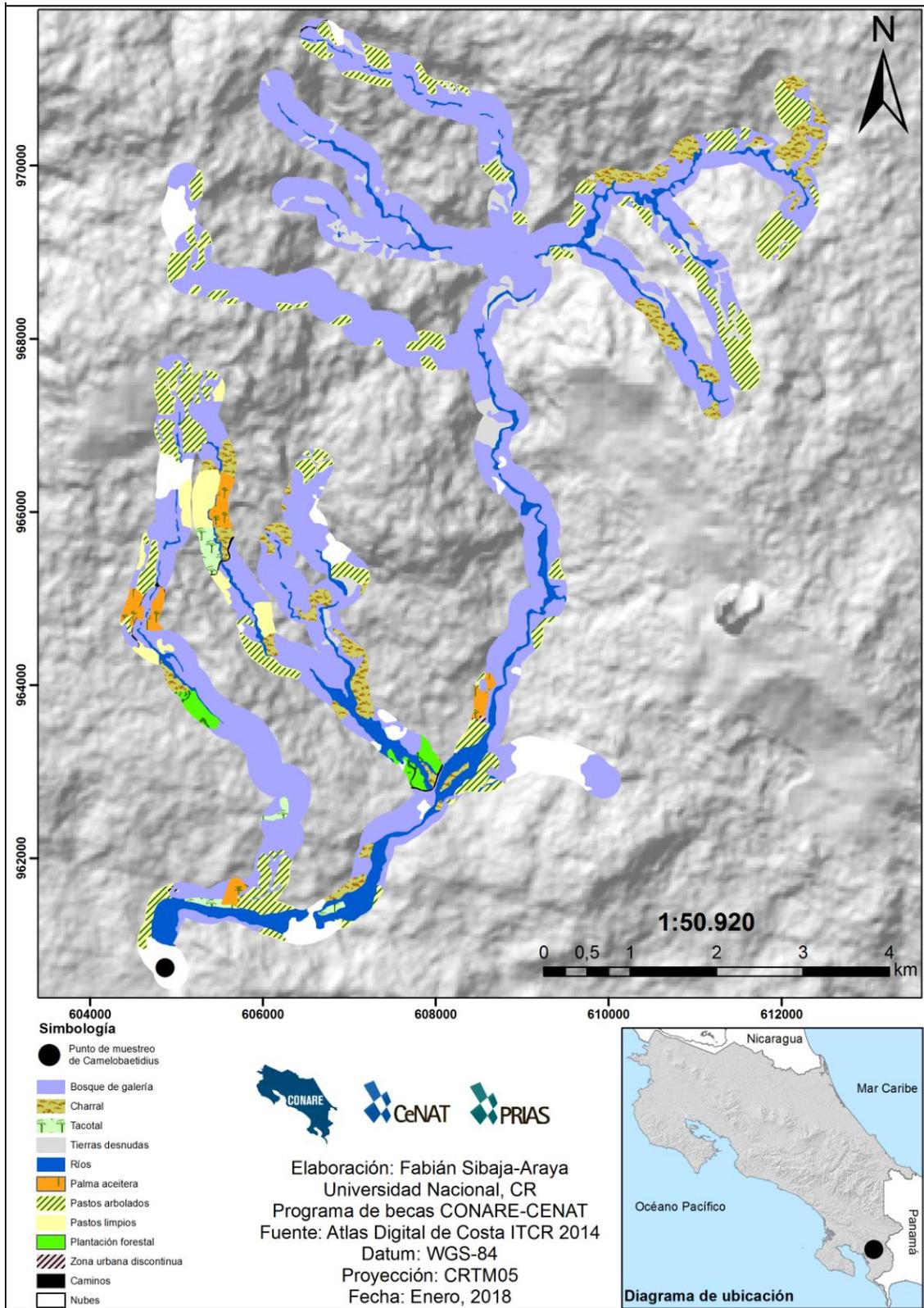
Anexo 5.17. Zona de influencia para Río Atirro



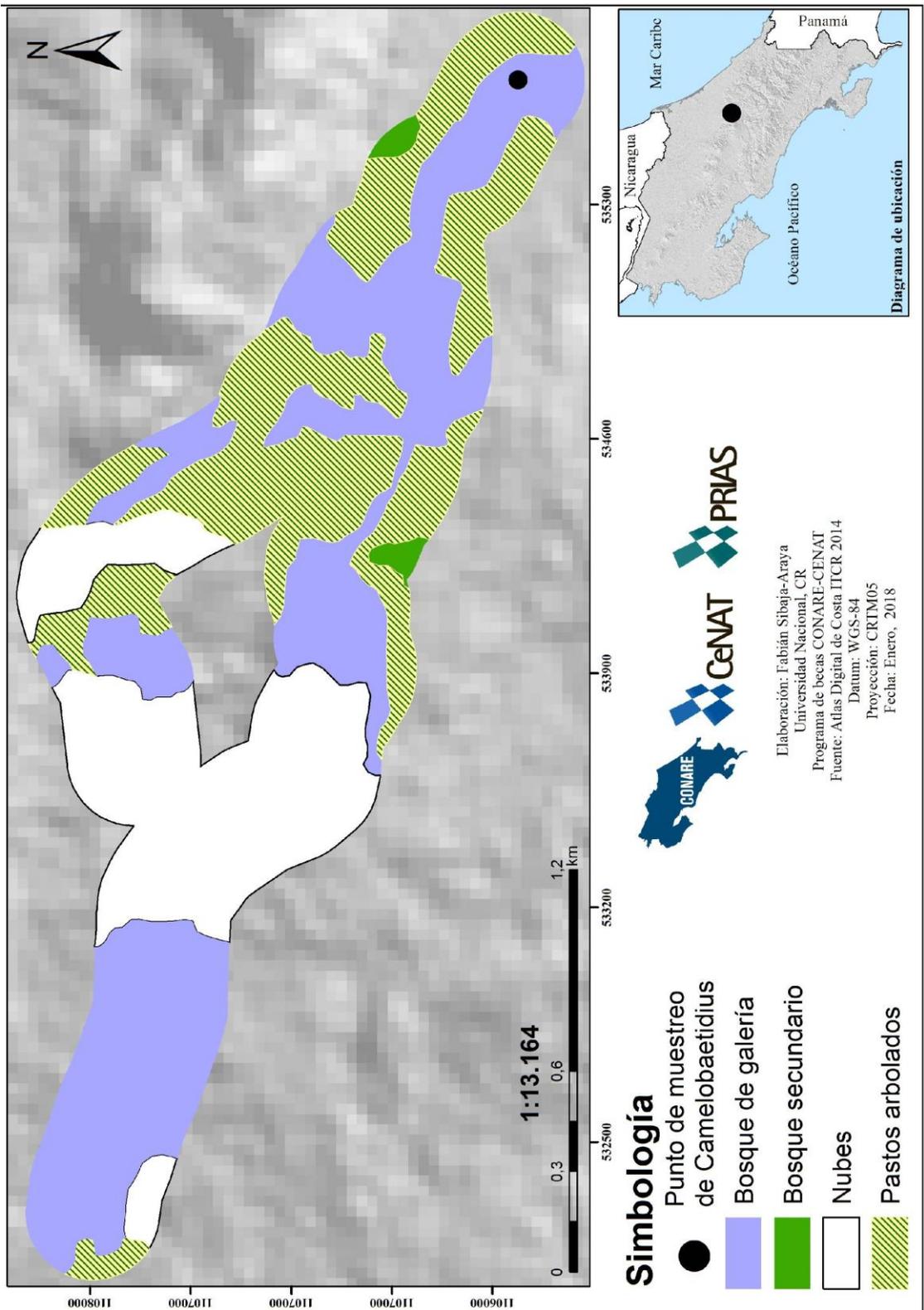
Anexo 5.18. Zona de influencia para Río Bonilla



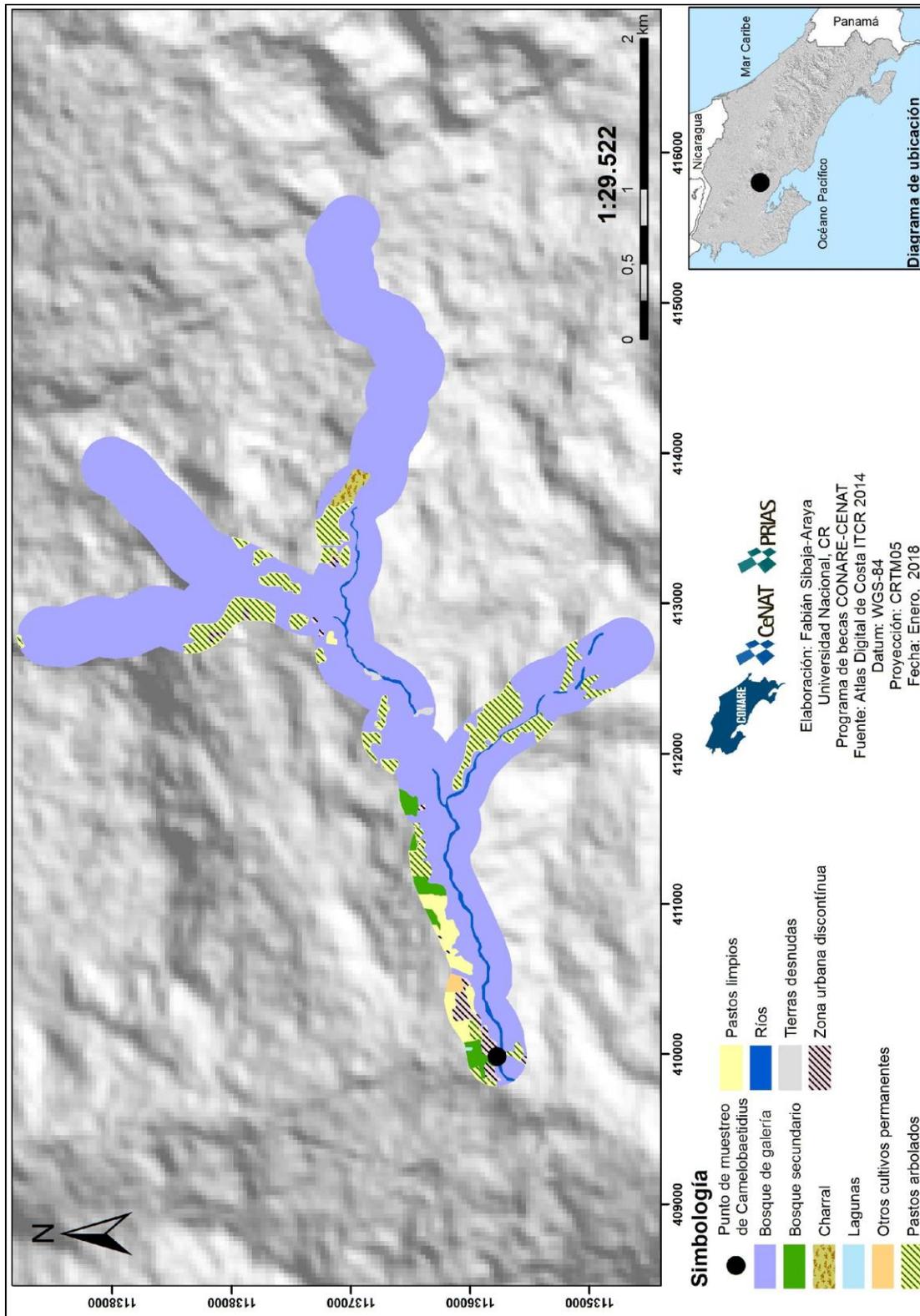
Anexo 5.19. Zona de influencia para Río Chirripó



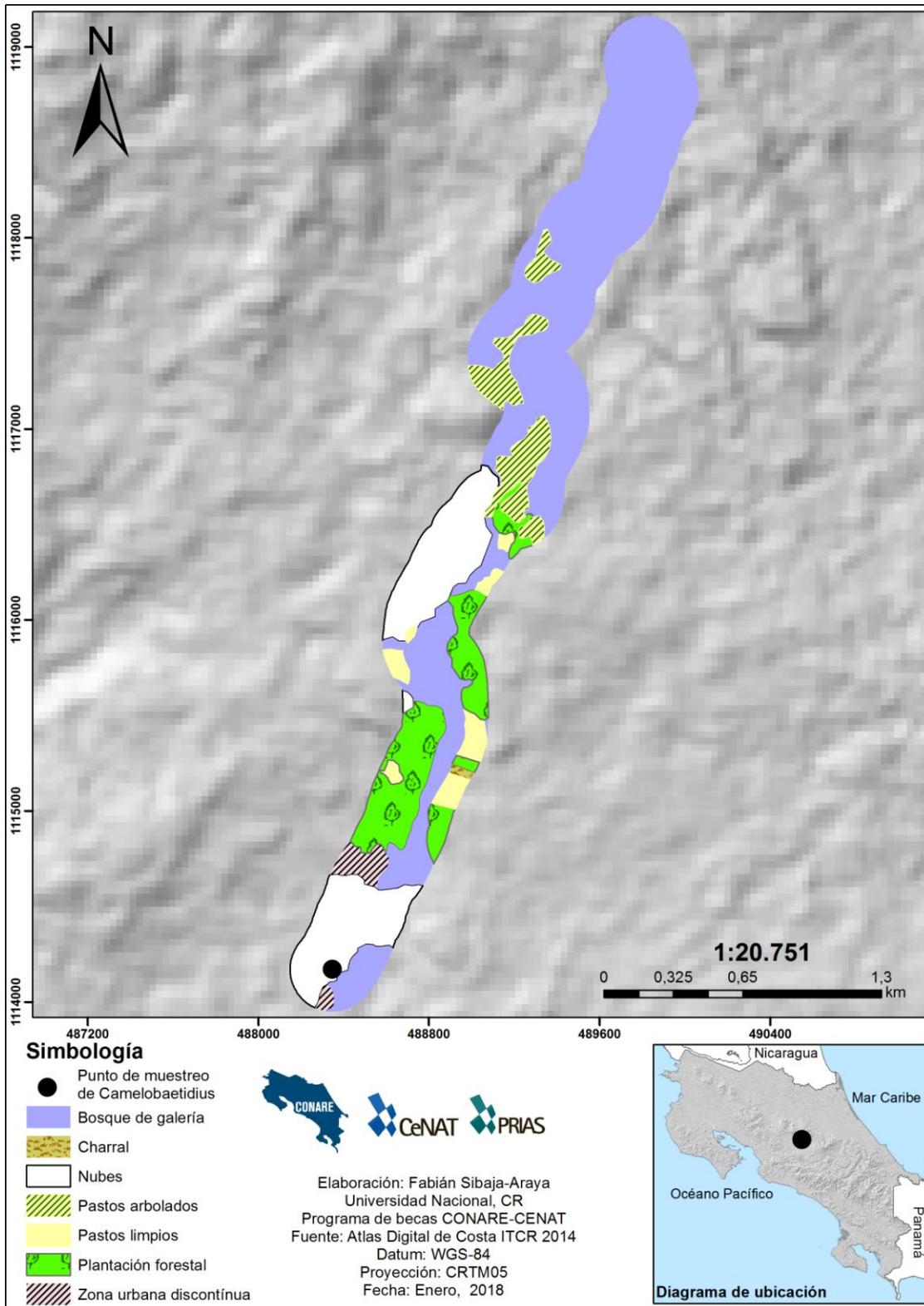
Anexo 5.20. Zona de influencia para Río Claro



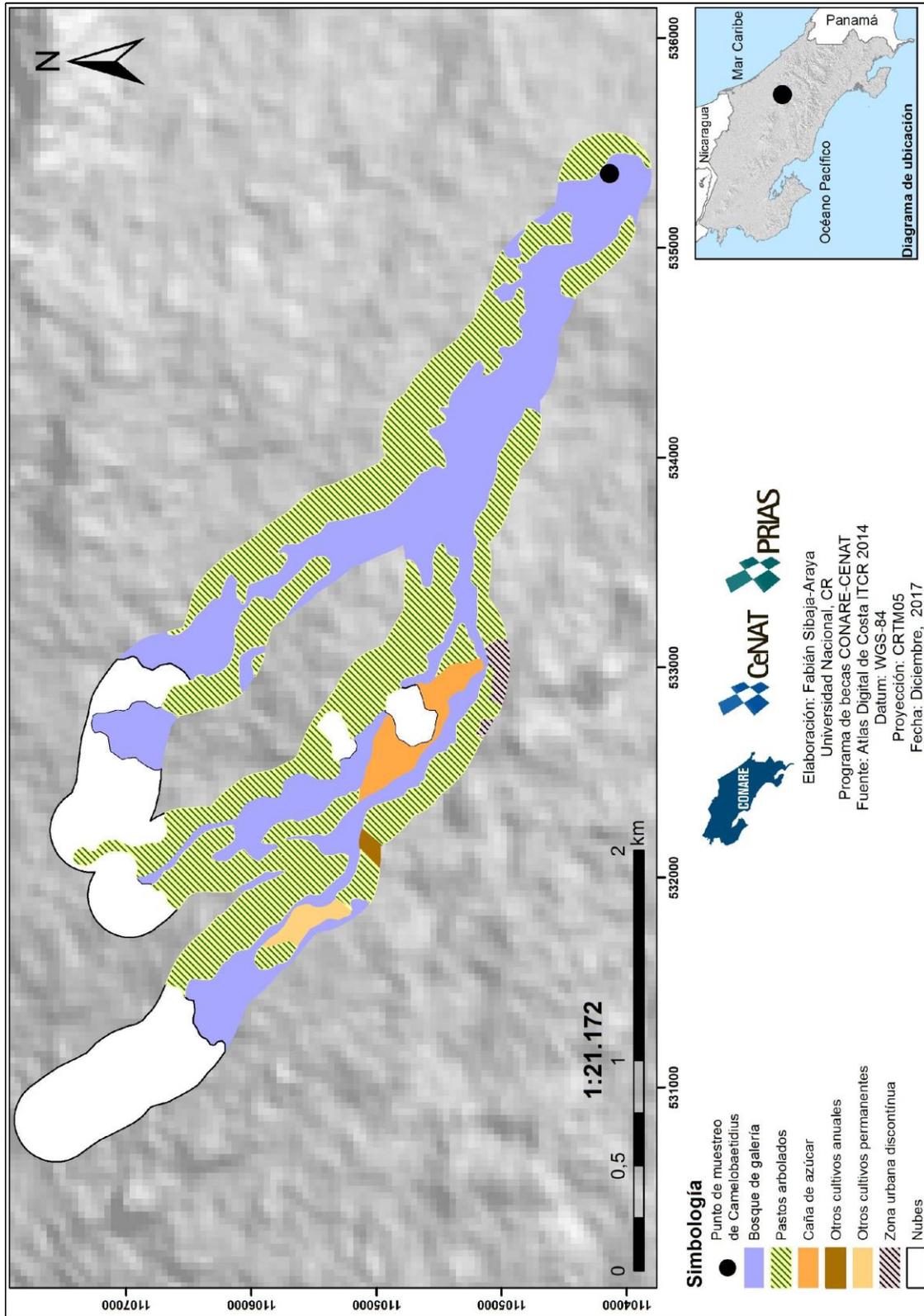
Anexo 5.21. Zona de influencia para Río Colima



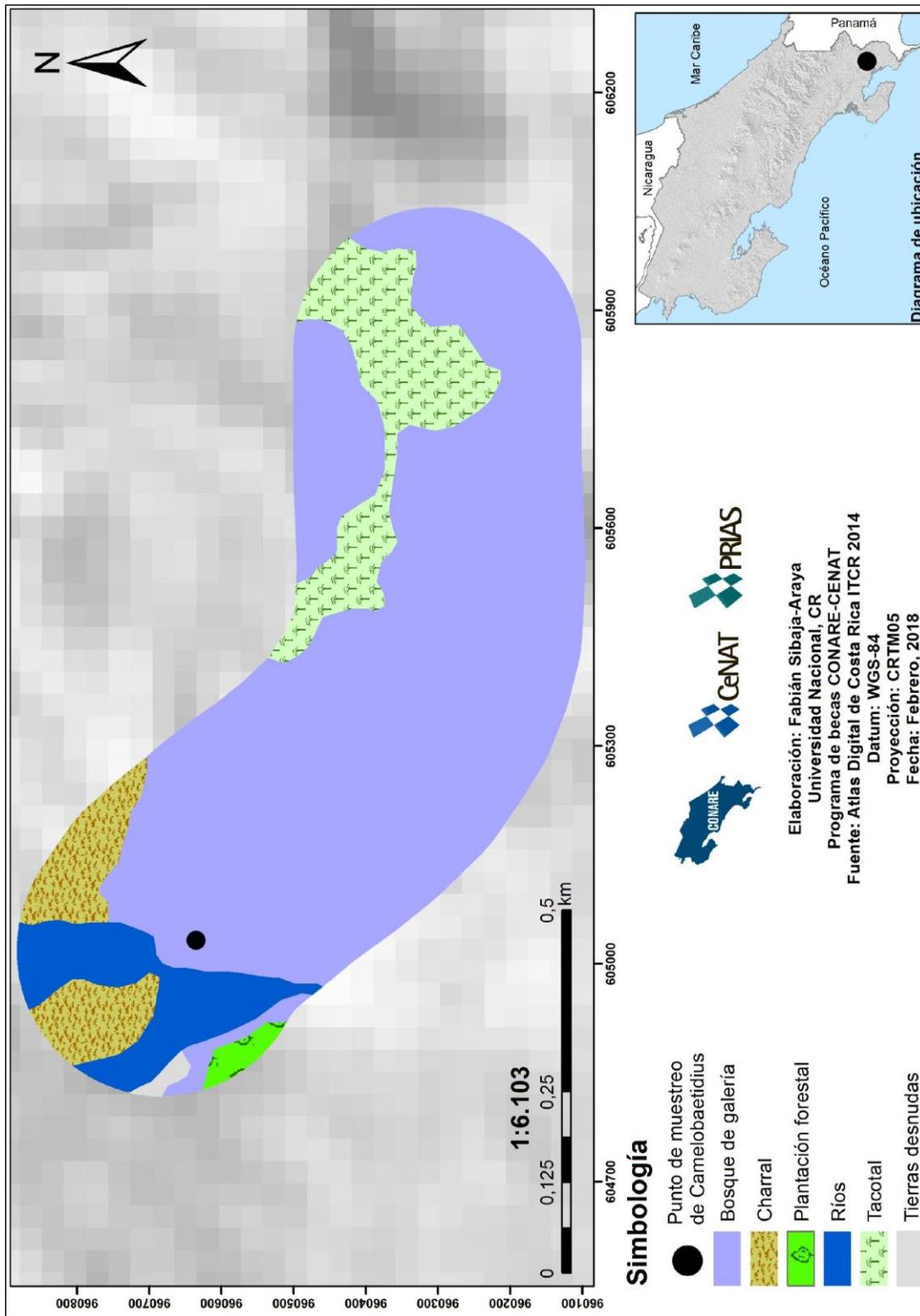
Anexo 5.22. Zona de influencia para Río San Luis



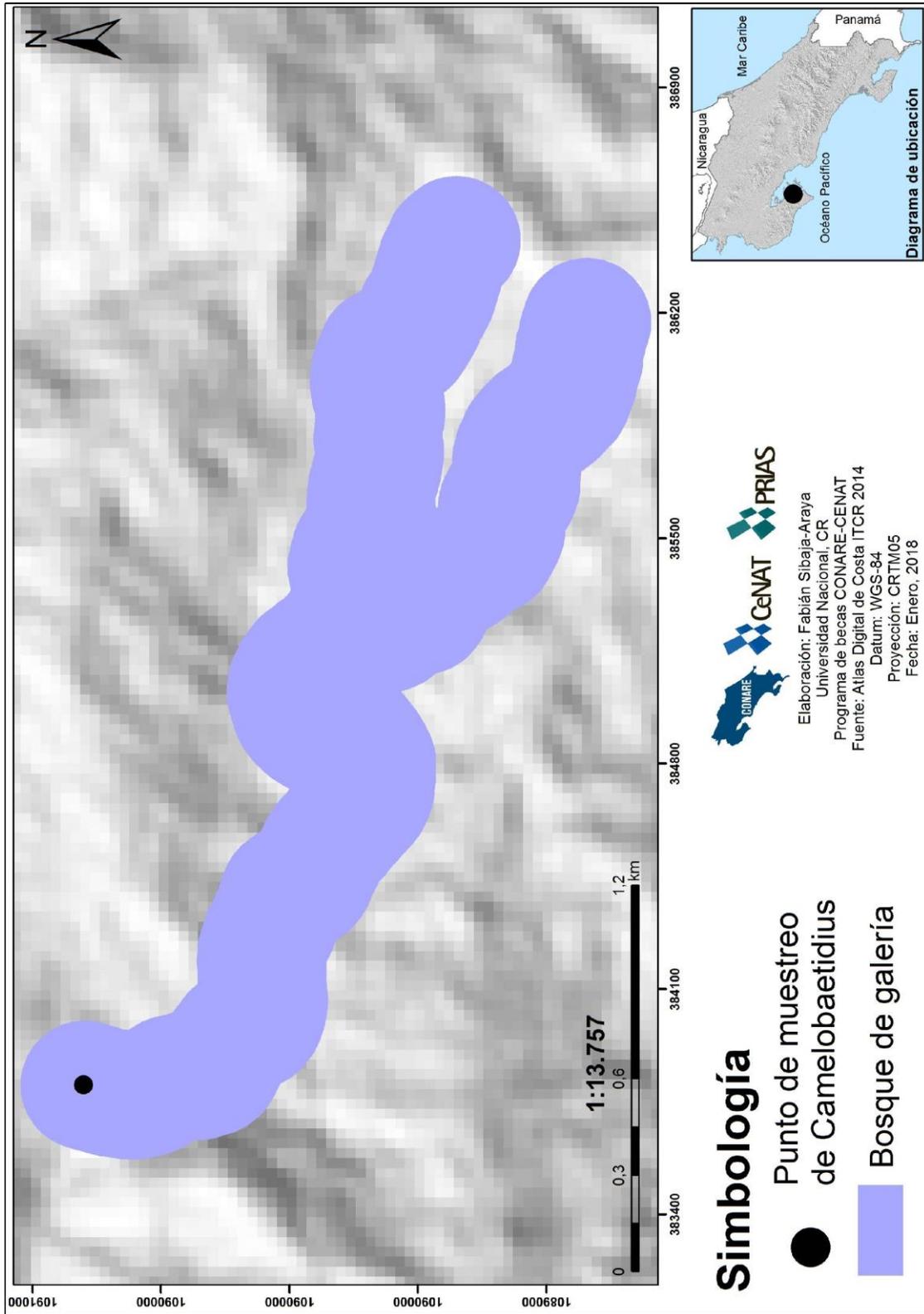
Anexo 5.23. Zona de influencia para Río Porrosatí



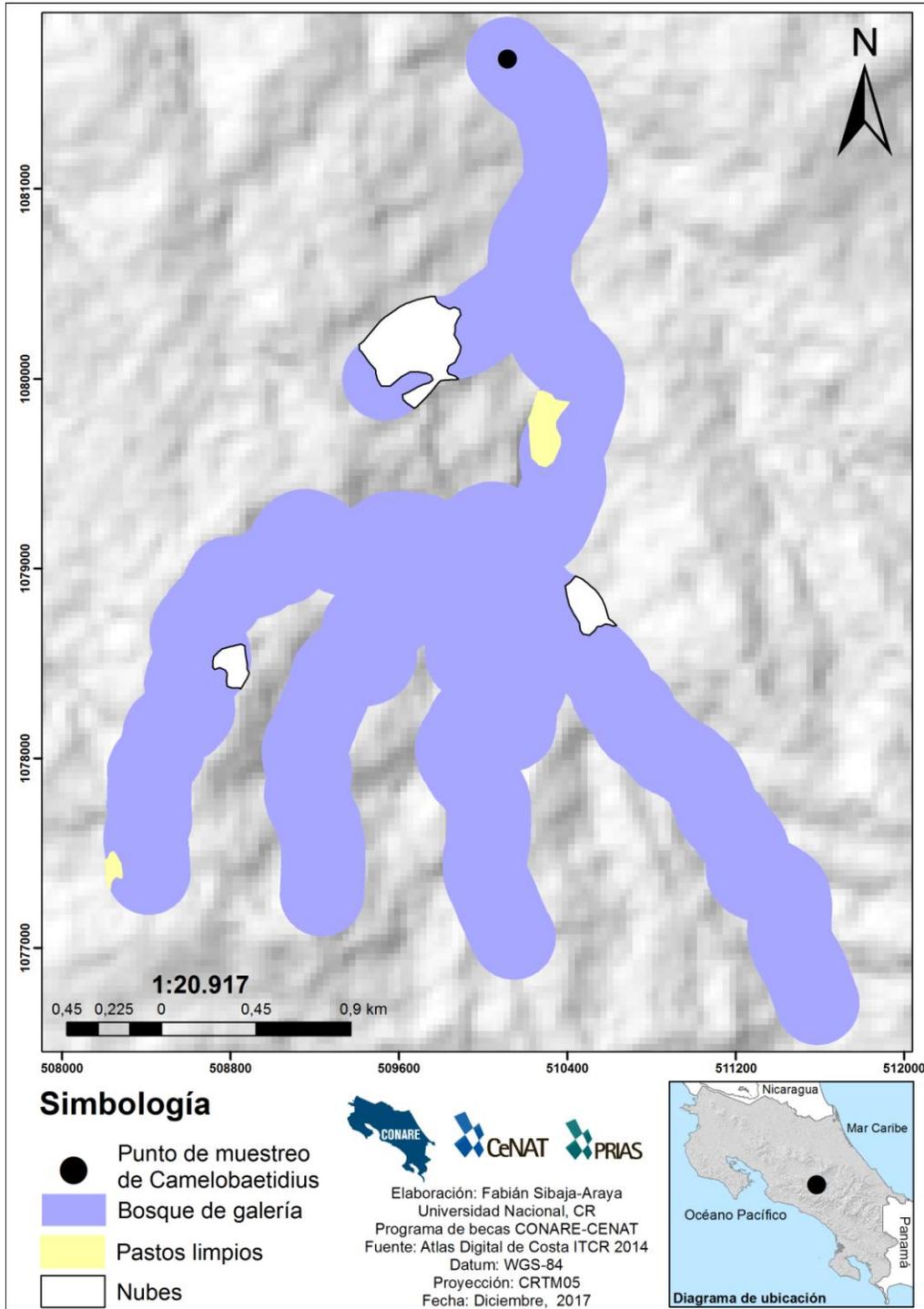
Anexo 5.24. Zona de influencia para Río Torito



Anexo 5.25. Zona de influencia para Quebrada Manigordo



Anexo 5.27. Zona de influencia para Río Blanco



Anexo 5.28. Zona de influencia para Río Sombrero