

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN PETROGÉNICA EN LA RESERVA NACIONAL PACAYA SAMIRIA



RAÚL YUSTA, GORKA MUÑOA,
PEDRO MAYOR, ANTONI ROSELL-MELÉ, MARTÍ ORTA

Institut de Ciència i Tecnologia Ambiental
Universitat Autònoma de Barcelona
Edifici Z Campus de la UAB
08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès)
Barcelona · Spain

Tel. (+34) 93 586 87 77 | Fax. (+34) 93 581 40 70 | icta@uab.cat
<http://ictaweb.uab.cat/>

Autores

Raúl Yusta¹

Gorka Muñoz¹

Martí Orta-Martínez^{1,2,*}

Pedro Mayor^{3,*}

Antoni Rosell-Melé^{1,5}

Carlos Gonzalez Crespo¹

¹ Institut de Ciència i Tecnologia Ambiental, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, Catalonia, Spain.

² International Institute of Social Studies, Erasmus University Rotterdam, The Hague, The Netherlands.

³ Dept. Sanitat i Anatomia Animals, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain.

⁵ Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, 08010 Barcelona, Catalonia, Spain.

*Correspondencia: E-mail: marti.orta@uab.cat or martiorta@gmail.com

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
3. METODOLOGÍA	13
3.1 ÁREA DE ESTUDIO	13
3.2 BASE DE DATOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS AMBIENTALES	14
3.3 EFECTO BATERÍA SOBRE EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN.....	17
3.4 NIVELES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL RESPECTO A LOS LÍMITES LEGALES.....	18
3.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN	18
3.6 ANÁLISIS ESPACIAL MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN	19
3.1.1. Estudio de la variación del índice de vegetación (NDVI).....	20
3.1.2. Fotointerpretación de la superficie cubierta de petróleo en Yanayacu	23
3.1.3. Clasificaciones mixtas.....	25
3.1.4. Cálculo de kilómetros de líneas de prospección sísmica	26
4. RESULTADOS	29
4.1 EFECTO BATERÍA SOBRE EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN.....	29
4.1.1 Efecto de la Batería nº3 sobre el nivel de contaminación en cursos fluviales....	29
4.1.2 Resultados del análisis estadístico en muestras de suelos.	32
4.2 NIVELES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL RESPECTO A LOS LÍMITES LEGALES.....	34
4.2.1 Comparación de valores ambientales en agua con los límites legales	34
4.2.2 Comparación de valores ambientales en suelo con los límites legales.	37
4.2.3 Comparación de valores de agua y suelo en periodo de la normativa actual	38
4.3 RESULTADOS CLASIFICADOS POR COMPUESTO.....	39
4.3.1 Aceites y grasas	39
4.3.2 Arsénico.....	40
4.3.3 Bario	42
4.3.4 Berilio	44
4.3.5 Boro	44
4.3.6 Cloruros	44
4.3.7 Conductividad.....	44
4.3.8 Cadmio	45
4.3.9 Cobalto	47
4.3.10 Cromo total	47

4.3.11	Cromo hexavalente	47
4.3.12	Estroncio.....	49
4.3.13	Fenoles	49
4.3.14	Litio.....	50
4.3.15	Mercurio.....	50
4.3.16	Molibdeno	53
4.3.17	Níquel	53
4.3.18	Plomo	54
4.3.19	Vanadio	56
4.3.20	Titanio.....	56
4.3.21	TPHs.....	57
4.3.22	TPHs C6-C10	57
4.3.23	TPHs C10-C28	58
4.3.24	TPHs C28-C40	59
4.4	ANÁLISIS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN	60
4.4.1	Estudio de la variación del índice de vegetación (NDVI).....	60
4.4.2	Fotointerpretación de la superficie cubierta por petróleo en Yanayacu	67
4.4.3	Clasificaciones mixtas.....	74
4.4.4	Líneas de prospección sísmica en el interior de la Reserva Nacional	77
5.	DISCUSIÓN.....	79
5.1	INDICADORES DE CONTAMINACIÓN PETROGÉNICA.....	79
5.2	EFFECTO BATERÍA SOBRE EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN EN AGUAS Y SUELOS.....	80
5.3	DISCUSIÓN DE LA COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES LEGALES.....	83
5.4	DISCUSIÓN DE LOS MAPAS DE DISTRIBUCIÓN	85
5.5	ANÁLISIS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN	87
6.	CONCLUSIONES.....	91
7.	AGRADECIMIENTOS	93
8.	REFERENCIAS.....	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de la zona de estudio.....	13
Figura 2- Fuentes de contaminación de la Batería nº3 considerados en nuestro estudio.	16
Figura 3- Ámbito de estudio para el análisis de las áreas afectadas.....	19
Figura 4-Máscara de nubes y sombras de la imagen Landsat del 14 de junio de 1989.....	21
Figura 5-Resultado de la aplicación de la máscara de agua.....	22
Figura 6.-Ámbito del estudio del análisis de la variación del NDVI en la RNPS.	23
Figura 7-Fotografía aérea del PAC del Lote 8.....	24
Figura 8. Ámbito de estudio de las clasificaciones mixtas.	26
Figura 9- Líneas de prospección sísmica PLUGRG96L54 y áreas deforestadas en el Lote 1AB...	27
Figura 10- Clasificación de las concentraciones en agua	30
Figura 11 - Clasificación de las concentraciones en suelos.....	33
Figura 12- Muestras de arsénico en agua (N= 127) en la zona de estudio.	41
Figura 13- Arsénico en muestras de suelo (N= 115) en la zona de estudio.	41
Figura 14- Muestras de bario en agua (N= 365) en la zona de estudio.	43
Figura 15- Bario en muestras de suelo (N= 120) en la zona de estudio.....	43
Figura 16- Muestras de cadmio en agua (N=207) en la zona de estudio.....	46
Figura 17- Cadmio en muestras de suelo (N= 120) en la zona de estudio.....	46
Figura 18- Muestras de cromo VI en agua (N= 57) en la zona de estudio.	48
Figura 19- Cromo (VI) en muestras de suelo (N=69) en la zona de estudio.....	49
Figura 20- Muestras de fenoles en agua (N= 142) en la zona de estudio.....	50
Figura 21- Muestras de mercurio en agua (N= 205) en la zona de estudio.	52
Figura 22- Mercurio en muestras de suelo (N=120) en la zona de estudio.	52
Figura 23- Muestras de níquel en agua (N=63) en la zona de estudio.....	54
Figura 24- Muestras de plomo en agua (N= 374) en la zona de estudio.	55
Figura 25- Plomo en muestras de suelo (N=120) en la zona de estudio.....	56
Figura 26- TPHs (C6-C10) en muestras de suelo (N= 100) en la zona de estudio.	58
Figura 27- TPHs (C10-C28) en muestras de suelo (N= 100) en la zona de estudio.	59
Figura 28- TPHs (C28-C40) en muestras de suelo (N= 100) en la zona de estudio.	60
Figura 29. Selección de píxeles con un valor de NDVI inferior a 0.7 en la imagen	61
Figura 30. Superficies (hectáreas) en que la vegetación presenta un incremento negativo de la producción primaria medida en NDVI en el interior de la RNPS y en su área de influencia.....	63
Figura 31. Superficies (hectáreas) en que la vegetación presenta un incremento positivo de la producción primaria medida en NDVI en el interior de la RNPS y en su área de influencia.....	64
Figura 32. Imagen detallada de la Batería de Yanayacu en las composiciones en falso color del 3 de julio de 1986 y del 22 de mayo de 1988 e identificación de zonas en las que el NDVI ha sufrido un incremento negativo.	65
Figura 33. Conjunto de áreas de las inmediaciones de la batería de Yanayacu que presentan un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas.	66
Figura 34. Conjunto de las áreas que en una o más ocasiones han presentado un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas de la serie temporal.	67
Figura 35. Superficie deforestada en la imagen del 6 de agosto de 1985	67
Figura 36. Evolución de la superficie cubierta de petróleo en la batería de Yanayacu en la RNPS entre los años 1985 y 2007.	69

Figura 37. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 06-ago-1985 (Landsat).....	70
Figura 38. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 03-ene-1988 (Landsat).	70
Figura 39. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 09-ago-1986 (Landsat).....	70
Figura 40. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 29-jul-1988 (Landsat).....	70
Figura 41. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 14-jun-1989 (Landsat).	71
Figura 42. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 14-jul-1994 (Landsat).....	71
Figura 43. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 06-jun-1992 (Landsat).	71
Figura 44. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 19-sept-1995 (Landsat).....	71
Figura 45. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 03-jul-1996 (Landsat).....	72
Figura 46. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 10-ago-1998 (Landsat).....	72
Figura 47. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 22-may-1998 (Landsat).....	72
Figura 48. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 13-ago-1999 (Landsat).....	72
Figura 49. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 21-oct-2001 (Landsat).	73
Figura 50. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 13-ago-2005 (Landsat).....	73
Figura 51. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 09-jul-2004 (Landsat).....	73
Figura 52. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 12-may-2006 (Landsat).....	73
Figura 53. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 19-ago-2007 (Landsat).....	74
Figura 54. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 31-jul-2007 (SPOT).....	74
Figura 55. Resultado de la clasificación Isodata a partir de las bandas 1,2,3,4,5 7 de la imagen Landsat del 6 de agosto de 1985.....	75
Figura 56. Resultado de la clasificación mixta del 6 de agosto de 1985.	76
Figura 57. Áreas de entrenamiento de la cubierta de zonas contaminadas por petróleo y resultado de esta categoría en la clasificación mixta de la imagen del 6 de agosto de 1985. ...	77
Figura 58. Líneas de prospección sísmica situadas dentro de los límites de la RNPS en base a la información cartográfica oficial de Petroperú.....	78

Figura 59. Superficie que presenta un incremento negativo del NDVI ponderado entre el 06/08/85 y el 09/08/86 y áreas con un incremento positivo del NDVI ponderado entre 09/08/86 y 03/01/88..... 88

Figura 60. Superficie deforestada en la imagen del 6 de agosto de 1985 o que en una o más ocasiones ha presentado un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas de la serie temporal y superficie de bosque afectada por el efecto de margen... 89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1- Compuestos incluidos en el presente trabajo.....	17
Tabla 2. Serie temporal de imágenes Landsat y SPOT utilizadas.	20
Tabla 3- Factores que distinguen estadísticamente a los valores en muestras de agua	31
Tabla 4- Factores que distinguen estadísticamente a los valores en muestras de suelo	33
Tabla 5- Comparación de los valores ambientales en agua con los límites legales	36
Tabla 6- Comparación de valores ambientales en suelo con los límites legales I.....	38
Tabla 7- Comparación de los valores ambientales de agua analizados entre 2008 y 2015.....	39
Tabla 8- Comparación de los valores ambientales de suelos analizados entre 2013 y 2015	39
Tabla 9. Umbrales utilizados para la selección de zonas que presentan incrementos negativos o positivos del NDVI	62
Tabla 10. Superficies que presentan un incremento negativo del NDVI entre dos imágenes consecutivas respecto al conjunto del área de estudio.....	62
Tabla 11. Superficies que presentan un incremento positivo del NDVI entre dos imágenes consecutivas respecto al conjunto del área de estudio.....	64
Tabla 12. Superficies cubiertas por petróleo en las inmediaciones de la batería 3 de Yanayacu en la RNPS.	68
Tabla 13. Superficie de las categorías clasificadas mediante la clasificación mixta del 6 de agosto de 1985.....	75
Tabla 14. Estimación de la deforestación estimada y del efecto margen causados por las líneas de prospección sísmica realizada en 1970 en la RNPS.....	78
Tabla 15. Resumen de la presencia de los compuestos químicos analizados en nuestro estudio en las aguas de formación del mundo (Fuente: Fakhru'l-Razi, 2009).....	80

1. INTRODUCCIÓN

El petróleo ha sido la principal fuente de energía de la sociedad en el siglo XX, y probablemente lo será en todo el siglo XXI. En la actualidad existe un incremento de la demanda de petróleo a nivel mundial y, sobre todo, en países en desarrollo, que ha aumentado la necesidad de acceder a nuevos yacimientos de hidrocarburos (Finer & Orta-Martínez 2010). Este contexto ha estimulado la explotación de recursos en zonas remotas de bosque húmedo tropical con elevado valor de conservación biológica, cultural o paisajística (Butt *et al.* 2013). La Amazonía occidental es una de las regiones donde se está observando un mayor avance de la explotación de petróleo debido a que esta zona cuenta con grandes reservas de hidrocarburos en grandes extensiones de selva tropical. Aunque la explotación petrolera en la Amazonía peruana alcanzó su máximo en la década de 1970, se ha observado en los últimos años un nuevo boom de exploración y extracción de hidrocarburos (Finer & Orta-Martínez 2010) en paralelo a la creciente demanda mundial (OPEC 2015), si bien no se puede confirmar cómo afectará a esta tendencia el reciente descenso en el precio del barril de crudo (World Bank 2015). Es tan amplia la actividad de extracción petrolera en esta región, que el 69% (540.000 km²) del territorio ha sido objeto de concesiones de hidrocarburos en algún momento entre 1970 y 2010. Si se incluyen en este análisis las concesiones propuestas por el gobierno peruano a fecha de 2010, además de las concedidas, únicamente el 10% de la Amazonía peruana quedaría excluido de actividades extractivas (Finer & Orta-Martínez 2010). En el norte de la Amazonía peruana (departamento de Loreto) existen 29 concesiones activas, de las que el 72% se superponen con áreas naturales protegidas, entre ellas la Reserva Nacional Pacaya Samiria (RNPS). El principal producto vertido debido a las actividades petroleras son las aguas producidas, que es el agua extraída del pozo junto al crudo. Las aguas producidas suponen el 70% del volumen total extraído de un pozo petrolero (Fakhru'l-Razi, 2009) y contiene disueltos grandes concentraciones de cloruros, hidrocarburos aromáticos, y metales pesados como el plomo, cadmio o mercurio entre otros (Neff, 2002). En la Amazonía peruana, las aguas de producción fueron inicialmente vertidas directamente a los ríos como productos de desecho. Sin embargo, a partir de enero de 2008 se implementó el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM (Ministerio del Ambiente, 2008), cesando el vertido de aguas producidas e iniciando el reinyectado los vertidos en pozos petroleros vacíos (Powers 2008).

El objetivo primordial de la RNPS es conservar los recursos de flora y fauna silvestre así como el paisaje característico de los bosques tropicales húmedos. La RNPS posee una alta diversidad de flora y fauna silvestre y una gran riqueza de vida acuática (INRENA 2009); e incluye más de 20 especies categorizadas a nivel nacional como amenazadas y más de 60 consideradas de valor económico y/o biomédico (IIAP 1994). La Reserva Nacional Pacaya Samiria es una de las áreas que conserva mayor diversidad biológica de la Amazonía peruana y alberga importantes humedales incluidos en la Convención Ramsar. En 1977 PetroPerú perforó el primer pozo para la explotación de hidrocarburos en el interior de la RNPS, en el marco en el lote denominado Lote 8/8x. Ese mismo año, entró en funcionamiento el Oleoducto Norperuano, que por el margen septentrional de la RNPS ha transportado el crudo de los yacimientos más productivos de la selva peruana, el Lote 1AB y el 8/8x. Los Lotes 1AB y 8 han producido históricamente el 68% y el 31% de la producción petrolera total estatal, respectivamente. Estas actividades

petroleras se iniciaron previamente al establecimiento de la Reserva Nacional en el año 1982 (Gobierno del Perú, 1982), fecha posterior al inicio de las actividades petroleras en la zona.

En 2013, como resultado de inspecciones de la zona por parte de las autoridades competentes, el gobierno peruano declaró el estado de emergencia ambiental en las cuencas de los ríos Marañón (Ministerio del Ambiente 2014), Pastaza (Ministerio del Ambiente 2013b), Corrientes (Ministerio del Ambiente 2013c), Tigre (Ministerio del Ambiente 2013d) y, y además en 2014 se declaró la Emergencia Sanitaria en las localidades de estas cuatro cuencas (Ministerio del Ambiente 2014b) debido al elevado riesgo a la salud y a la vida de los pobladores por la grave contaminación producida por la explotación petrolera. En el caso de la Reserva Nacional Pacaya Samiria, la eventual situación de contaminación causada por el Lote 8X es especialmente preocupante, debido al elevado valor biológico de este espacio natural y a la ausencia de un monitoreo ambiental comunitario en la zona, que pueda evitar un mejor control de los derrames petroleros. Consecuentemente aún se desconoce el impacto que puede suponer estas actividades petroleras sobre el ecosistema de la Reserva Nacional Pacaya Samiria.

2. OBJETIVOS

El objetivo general del estudio consiste en determinar el impacto causado por vertidos de hidrocarburos y aguas de formación a lo largo del período de operaciones petroleras en la RNPS.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo general descrito, se han diseñado los siguientes objetivos específicos:

- Determinar los niveles ambientales de concentración de compuestos químicos petrogénicos en la RNPS y su área de influencia entre los años 1994 y 2015
- Determinar el porcentaje de muestras ambientales colectadas entre los años 1994 y 2015 que superan los límites legales según legislación nacional e internacional.
- Analizar los factores temporales, estacionales y geográficos que contribuyen a explicar la contaminación reportada en la RNPS y su área de influencia entre los años 1994 y 2015.
- Estudiar la distribución espacial de la contaminación en la RNPS y su área de influencia.
- Identificar y cuantificar las áreas deforestadas como consecuencia directa de la actividad extractiva de petróleo entre los años 1984 y 2015.
- Identificar y cuantificar la mortalidad arbórea y la disminución de la producción primaria causados por la actividad petrolera entre los años 1984 y 2015.

3. METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en la Reserva Nacional Pacaya Samiria (Figura 1), que es el área comprendida entre el río Marañón a la altura del poblado Pucacuro, el río Pacaya a la altura del poblado Vista Alegre y la confluencia entre ambos. Se añade como zona de estudio un área de amortiguamiento, de aproximadamente 10 kilómetros de amplitud desde el borde de la RNPS, para abarcar así la zona del oleoducto Norperuano.

En la RNPS las aguas producidas se han vertido desde el comienzo de la actividad petrolera en 1977 y hasta 1995 en la laguna junto a las instalaciones de la Bateria 3. Esta laguna se sitúa a pocos metros al este de las instalaciones y su drenaje vierte hacia el sur (Pluspetrol Norte S.A, 2005), hacia el interior de la RNPS. Entre octubre de 1995 y octubre de 1998 se vertió el 25% de las aguas producidas a la quebrada Huistoyanayaquillo, el resto continuó vertiéndose en la laguna. Entre octubre de 1998 y diciembre de 2007 se vertieron todas las aguas de producción en el río Marañón a través de un acueducto (Powers 2008). En enero de 2008 se inició la reinyección de las aguas producidas en pozos vacíos, de acuerdo a los compromisos establecidos en el Acta de Dorissa (MINEM, 2006).

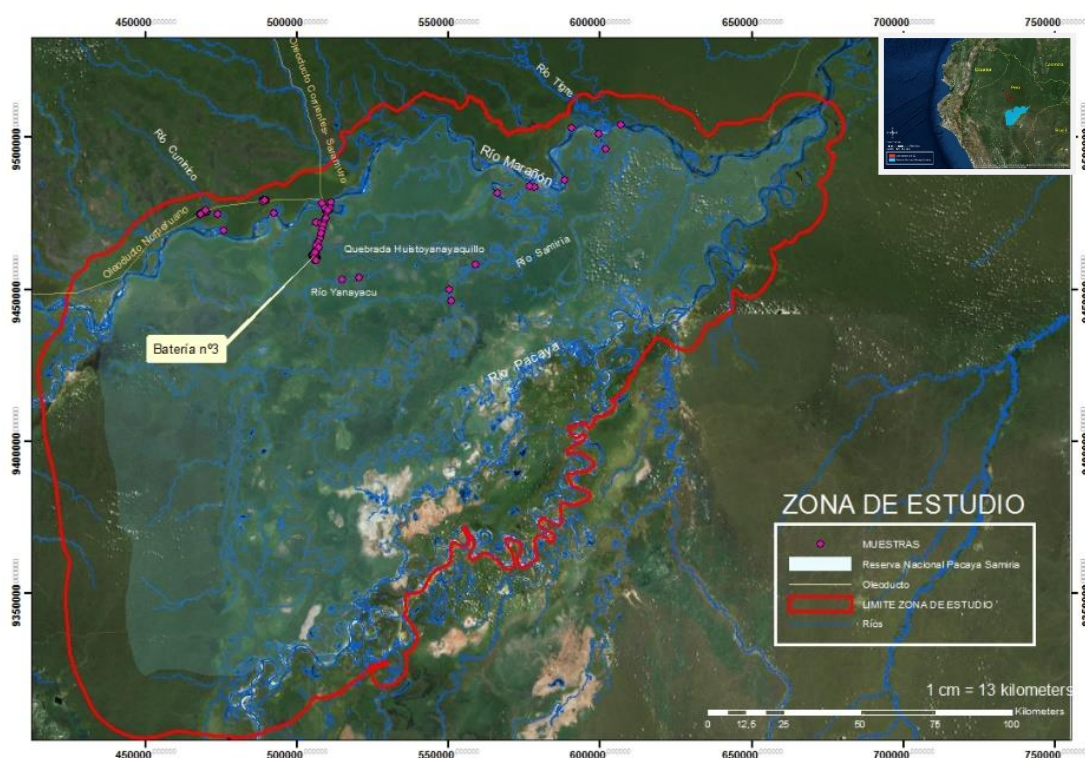


Figura 1- Mapa de la zona de estudio. Esta incluye la RNPS y una zona de amortiguamiento de 10 km desde la RNPS.

3.2 BASE DE DATOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS AMBIENTALES

Se colectaron 73 informes técnicos generados por diferentes instituciones públicas y privadas que ha permitido crear una base de datos con análisis químico de 420 muestras de agua y de 145 muestras de suelos en la Reserva Nacional Pacaya Samiria. Las fuentes de estos reportes incluyen a la empresa Pluspetrol Norte S.A., y a distintas instituciones públicas peruanas: Agencia Nacional del Agua-ANA-, Organismo de Fiscalización y Evaluación Ambiental –OEFA-, Dirección General de Salud Ambiental –DIGESA-, Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minas –OSINERGMIN- y Universidad Nacional de la Amazonía Peruana –UNAP-. Se han recopilado en cantidades diversas datos de 52 compuestos químicos en aguas y de 56 compuestos químicos en suelos, procedentes de 73 reportes distintos.

Todos los resultados de análisis químicos presentan un nivel mínimo de detección (o Límite de Detección -LD-), debajo del cual la metodología utilizada no puede discriminar la concentración del compuesto químico. Los valores LD varían en cada reporte en función del método de análisis escogido. Se calculó el número y porcentaje de concentraciones inferiores al LD, y fueron consideradas numéricamente como el 50% del LD de detección de cada caso, siguiendo las recomendaciones de la normativa EPA norteamericana (U.S Environmental Protection Agency 1997) y otras fuentes (Lubin J.H. *et al.* 2004). Todas las mediciones categorizadas como "no detectado" (ND) o mediante "0" fueron igualmente considerados como valores LD. En el caso de que el informe no especificara el LD de la metodología utilizada, se consideró el LD del año más cercano al de toma de muestra y de la misma institución. El Anexo 2 muestra las sustituciones realizadas para cada compuesto químico.

Todas las muestras recopiladas tienen las coordenadas geográficas en UTM WGS1984 que referencian el lugar de colecta. Adicionalmente, cada muestra se ha registrado con información que permite clasificarla, y que puede ser un factor influyente en el valor de la muestra. Esta información incluye:

- **Año de colecta de la muestra**, clasificados entre los años 1994 y 2015. Es importante destacar que el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM - Categoría 4: Ríos de Selva (Ministerio del Ambiente, 2008) fue implementado a partir del año 2008. Igualmente, a partir de enero de 2008 cesó el vertido de aguas producidas de la Bateria n° 3, y se inició el reinyectado los vertidos hacia pozos petroleros vacíos (Powers 2008). Se presume que los cambios en la estrategia vertimiento de las aguas de formación a lo largo de los años ha podido tener una importancia clave sobre la contaminación ambiental en la zona de estudio.
- **Tipo de muestra**: agua o suelo.
- **Cuenca fluvial**. Todas las muestras fueron clasificadas en función de la cuenca fluvial a la que pertenecen, entendiendo por cuenca fluvial la extensión de territorio cuyas aguas de lluvia convergen hacia los ríos Maraón, Samiria, Cuninico y quebrada Huistoyanayaquillo. La cuenca puede condicionar el resultado debido a la diferente capacidad de dilución que tienen los ríos con bajo caudal (Huistoyanayaquillo, Cuninico o Samiria) y con el elevado caudal del río Maraón.
- **Posición relativa respecto al punto de vertido (aguas arriba/aguas abajo)**. Las muestras analizadas se han catalogado según su posición *aguas arriba* o *aguas abajo* respecto de las potenciales fuentes de contaminación de la batería n°3 (Figura 1), utilizando el software

Arcgis 10.3 y las coordenadas geográficas (UTM 1984 WGS) de la muestra. Este factor permite comparar niveles previos y posteriores al vertido, y consecuentemente determinar el efecto de la batería sobre la calidad de las aguas. Se ha considerado *aguas abajo*: a) Las muestras colectadas en el río Marañón tras el punto de vertido de la batería nº 3; b) Todas las muestras colectadas en la quebrada Huistoyanayaquillo tras el punto de vertido de la batería (en la intersección de la quebrada y el oleoducto batería-Marañón); c) Las muestras colectadas en río Samiria tras recibir los vertidos de la batería nº3 vía otros afluentes; d) Las muestras colectadas en las inmediaciones de las infraestructuras petroleras que componen la batería nº 3 (Anexo 1, Figura 2).

- **Estacionalidad.** El régimen hidráulico estacional de los ríos en la zona de estudio fue definido por épocas de vaciante (Agosto-Octubre), creciente (Marzo-Mayo) y la de transición (Noviembre-Febrero, y Junio-Julio) (Dirección de Hidrografía y Navegación, 2006). Se estima que el caudal variable en función de la estacionalidad de los ríos, puede influir en los niveles de contaminación por efecto de dilución y de movilización de sedimentos fluviales.
- **Distancia a la probable fuente de contaminación.** Este factor se define como la distancia entre el lugar de colecta de la muestra y el foco de contaminación más cercano. Se han considerado como probables fuentes de contaminación a los puntos de vertido de aguas producidas y a las instalaciones que componen la batería nº3: plataformas 60, 38, 32 y edificio de bombeo. Sólo se ha calculado en muestras de suelos. Es un factor que permite determinar variaciones de concentración de los contaminantes a medida que aumenta la distancia desde la probable fuente de contaminación. La Figura 1 muestra las fuentes de contaminación consideradas.



Figura 1- Fuentes de contaminación de la Batería nº3 considerados en nuestro estudio. Incluye los puntos de vertido al río Marañón y Huistoyanayaquillo y las instalaciones que componen la batería.

De todos los compuestos químicos recopilados en la base de datos (52 en aguas y 56 en suelos) se han excluido los que tienen simultáneamente no son característicos de las aguas de producción (Fakhru'l-Razi, 2009) y están presente en los suelos de forma natural. Se ha trabajado con los siguientes compuestos químicos:

COMPUESTO QUÍMICO	EN AGUA		EN SUELOS	
	N total	N valores LD	N total	N valores LD
Plomo	374	208	120	10
Mercurio	205	195	120	79
Fenoles	142	107	--	--
Cadmio	207	143	120	65
Cromo VI	57	17	69	65
Níquel	63	38	39	1
Arsénico	127	112	115	22
Bario	365	107	120	1
Cromo total	148	91	40	0
Estroncio	29	0	34	0
Aceites y grasas	393	265	--	--
Antimonio	29	29	39	6
Azufre	--	--	5	2
Berilio	31	27	39	1
Boro	29	11	34	29
Conductividad*	107	0	--	--
Cloruros	355	0	--	--
Cobalto	29	18	39	1
Litio	29	23	34	3
Molibdeno	--	--	39	17
Talio	--	--	39	30
Titanio	--	--	34	0

COMPUESTO QUÍMICO	EN AGUA		EN SUELOS	
	N total	N valores LD	N total	N valores LD
TPHs	167	151	22	3
TPHs C6-C10	--	--	100	84
TPHs C10-C28	--	--	100	7
TPHs C28-C40	--	--	100	3
Vanadio	31	9	39	0
Naftaleno	10	7	45	45
Acenaftileno	39	39	45	45
Acenafteno	39	39	45	45
Benzo(a) antraceno	34	34	45	45
Benzo(a)pireno	39	39	45	42
Benzo(b) fluoranteno	39	39	45	43
Benzo(g,h,i) perileno	39	39	45	44
Criseno	39	39	45	40
Dibenzo(h,a) antraceno	39	39	45	44
Fenantreno	39	39	45	41
Fluoranteno	39	39	45	44
Fluoreno	39	39	45	43
Indeno(1,2,3,c,d)pireno	39	39	16	16
Benzo(e)pireno	39	39	--	--
Pireno	39	39	45	41
Antraceno	--	--	45	45
Benzo(k) Fluoranteno	--	--	45	43

Tabla 1- Compuestos incluidos en el presente trabajo. Los valores LD son los valores bajo el límite de detección.

Los valores excepcionalmente elevados han sido considerados como *outliers* -valores atípicos- cuando son superiores a tres veces la desviación estándar. Han sido excluidos del estudio estadístico (Anexo 7) pero se consideran en los mapas de distribución espacial (capítulo 4.3) y en el estudio comparativo con los límites legales (capítulo 4.2).

3.3 EFECTO BATERÍA SOBRE EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN

El estudio del efecto de la Batería nº3 sobre los niveles de contaminación de agua y suelos se realizó a partir de 377 muestras de agua y 86 de suelos. Se consideraron únicamente muestras de agua colectadas en las cuencas de los ríos Marañón, Samiria y quebrada Huistoyanayaquillo. No se han incluido: a) muestras de agua del río Cuninico debido al bajo tamaño muestral ($n=9$); b) muestras cercanas a oleoductos debido a que pueden ocultar o distorsionar el efecto de contaminación de la Batería nº3; c) compuestos químicos que únicamente contienen valores LD; y d) valores considerados outliers, debido a que son valores excesivamente elevados y no explican las tendencias estadísticas sino eventos puntuales. Para determinar el efecto de los vertidos de agua producida de la Batería nº 3 se ha utilizado un análisis estadístico de particiones recursivas (CART, árboles de clasificación y regresión). Se ha utilizado la *cross-validación* y el mínimo error relativo para seleccionar el árbol más parsimonioso (*tree pruning*) (Breiman et al., 1984). En el análisis del efecto sobre las aguas, la variable dependiente fue la concentración de los diferentes elementos químicos y propiedades físicas; las variables independientes (factores) considerados fueron año y estación climática cuando se colectó la muestra, cuenca fluvial y posición relativa de la muestra (aguas arriba o abajo). En el caso del análisis del efecto sobre los suelos adicionalmente se incluyó la distancia entre el punto de colecta y la probable fuente de contaminación. Al carecer de suficientes datos previos al vertido se excluyó como factor la ubicación respecto de este en suelos. Todos los CART han sido realizados usando el paquete RPART (Therneau et al. 2013) en R Software 3.2.2 (R Development Core Team 2015).

3.4 NIVELES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL RESPECTO A LOS LÍMITES LEGALES

Se ha calculado el porcentaje de muestras cuya concentración de contaminantes supera a los límites permitidos registrados por legislación vigente nacional e internacional. En el caso de muestras de agua las normativas consideradas han sido:

1. Estándares nacionales de Calidad Ambiental para agua (ECA Agua). Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4: Ríos de Selva (Ministerio del ambiente 2008).
2. Estándares nacionales de Calidad Ambiental para agua (ECA Agua). Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 1: Agua que pueden ser potabilizadas con desinfección (Ministerio del ambiente 2008).
3. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life (Canadian Council of Ministers of the Environment 2001).
4. European Union standards for drinking water quality (Council of the European Union 1998).

En el caso de muestras de suelo:

1. Estándares nacionales de Calidad Ambiental para suelos (ECA Suelos). Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM. Categoría Suelo residencial y parques (Ministerio del ambiente 2013).
2. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Residential soil (Canadian Council of Ministers of the Environment 2006).

En este análisis comparativo se ha incluido todos los valores de la base de datos incluyendo las muestras colectadas antes de la vigencia de las respectivas legislaciones. Paralelamente, se realizó el mismo análisis incluyendo únicamente las muestras ambientales colectadas durante el período de vigencia de la ley.

La normativa canadiense otorga a cada contaminante dos límites de permisividad: corto plazo y largo plazo. En este estudio se consideró el límite a largo plazo que es una referencia del valor que protege flora y fauna contra los efectos negativos durante exposiciones de tiempo indefinido.

3.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN

Se han confeccionado mapas que muestran la distribución espacial de los compuestos químicos mediante el software Arcgis 10.3. El valor ambiental de cada análisis no se muestra en mg/l sino en forma de porcentaje del límite legal que representa cada valor. Los valores mayores de 100% son superiores al límite legal vigente para un compuesto en particular. Los rangos de porcentaje que clasifican los mapas no son iguales, sino que en cada caso se han agrupado a los valores de forma que quedan bien representados dada la distribución original de cada compuesto químico.

Se han reportado ubicaciones habituales de toma de muestras en las que el mapa muestra un solo punto pero hay, en realidad, varios puntos superpuestos tomados en la misma ubicación. Como en estos casos solo se puede mostrar un punto el elegido ha sido el valor mayor de los que comparten esa misma ubicación.

3.6 ANÁLISIS ESPACIAL MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

Con la finalidad de determinar el área afectada por derrames de petróleo y/o vertidos de aguas de formación derivados de la actividad petrolera en la RNSP (en concreto en la quebrada Yanayacu), se han aplicado técnicas de teledetección basadas en el análisis de una serie temporal de 18 imágenes de satélite de baja resolución que permite evaluar el cambio de cobertura del paisaje (Land Cover Change) de una serie temporal de imágenes Landsat 5TM durante el período 1985-2007 (Tabla 2). El estudio comienza en 1985, año de lanzamiento del satélite Landsat 5 TM+ y concluye en el año 2007, a partir del cual, debido a nubosidad no hay más imágenes de este satélite útiles para realizar el estudio. Se ha utilizado también una imagen SPOT 5 de alta resolución con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con las imágenes de menor resolución. Se ha descartado la inclusión de imágenes Landsat 7 ETM+ en el estudio debido a que desde el año 2003 sus imágenes presentan franjas de datos inválidos (gaps) como consecuencia de la rotura de uno de sus sensores.

El ámbito geográfico de estudio se ha restringido a una zona que por el norte incluye el oleoducto contiguo al río Marañón, al oeste llega hasta la desembocadura del río Nucuray en el río Marañón (poco después de la desembocadura del río Huallaga), al este incluye el río Saramuro y al sur incluye el límite meridional del Lote 8 (Figura 2).

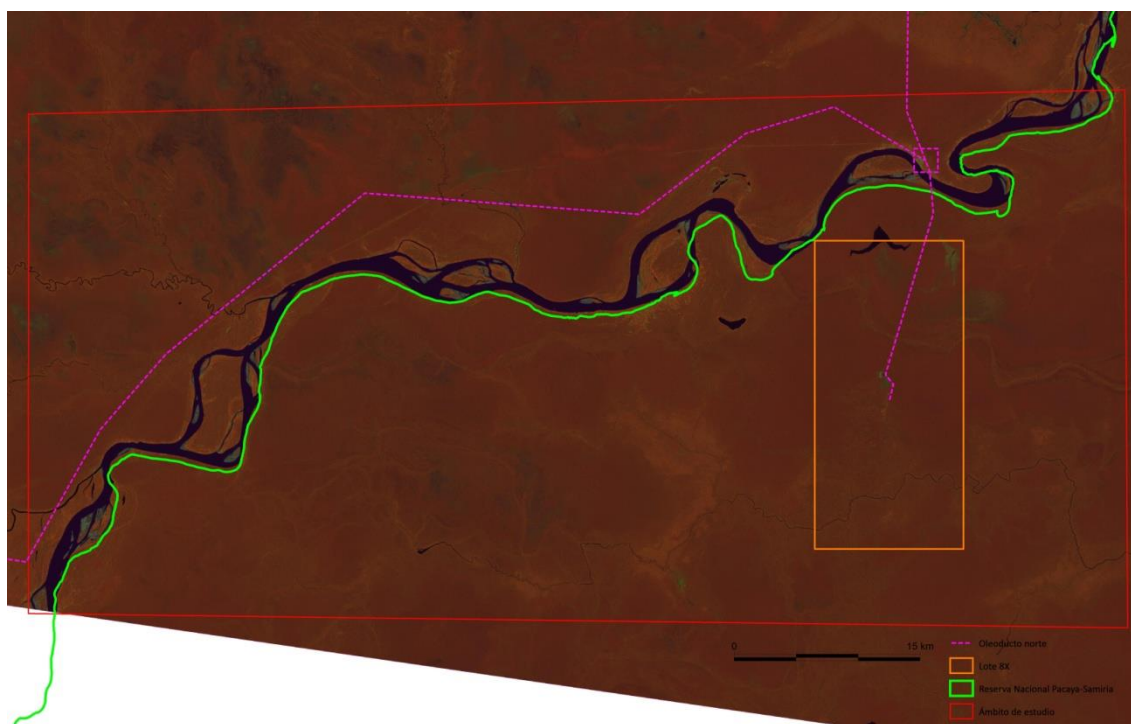


Figura 2- Ámbito de estudio para el análisis de las áreas afectada por la actividad petrolera mediante técnicas de teledetección en la RNPS y su área de influencia.

Se han usado imágenes correspondientes a la temporada de vaciante (entre mayo y octubre) para evitar la influencia del elevado nivel de agua sobre la respuesta espectral de la vegetación. En un único caso, imagen del 3 de enero del 1988, se ha considerado una imagen en temporada de creciente a fin de analizar el grado de influencia de la estacionalidad sobre los resultados.

En la mayor parte de los casos se ha optado por el análisis de una imagen anual, excepto para los años 1988 y 1998 para los cuales se ha contado con dos imágenes y para los años 1987, 1990, 1991, 1993, 1997, 2000, 2002 y 2003, en los cuales no hay disponible ninguna imagen de Landsat libre de nubes.

Fecha	Satélite	Fecha	Satélite
06/08/1985	Landsat 5	22/05/1998	Landsat 5
09/08/1986	Landsat 5	10/08/1998	Landsat 5
03/01/1988	Landsat 5	13/08/1999	Landsat 5
29/07/1988	Landsat 5	03/09/2001	Landsat 5
14/06/1989	Landsat 5	09/07/2004	Landsat 5
06/06/1992	Landsat 5	13/08/2005	Landsat 5
14/07/1994	Landsat 5	12/05/2006	Landsat 5
19/09/1995	Landsat 5	31/07/2007	SPOT 5
03/07/1996	Landsat 5	19/08/2007	Landsat 5

Tabla 2- Serie temporal de imágenes Landsat y SPOT utilizadas.

Los análisis de teledetección se han llevado a cabo mediante el *software* MiraMon (Pons 2004), desarrollado por el Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF).

3.1.1. Estudio de la variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Para analizar los impactos generados por la actividad extractiva de petróleo en el Lote 8X, en primer lugar se ha determinado el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que describe la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, y es utilizado como indicador de estrés de la vegetación debido a contaminación.

Se ha realizado el análisis de una serie temporal de 17 imágenes del satélite Landsat 5 (Tabla 2) para detectar todas aquellas zonas donde el NDVI (Rouse *et al.* 1973) presenta variaciones significativas compatibles con cambio de uso de suelo o con la contaminación provocada por los derrames de petróleo.

Para llevar a cabo el análisis de las imágenes, éstas han sido tratadas como se describe a continuación:

1. Las imágenes han sido corregidas radiométricamente mediante el método propuesto por Pons & Solé-Sugrañes (1994), de forma que los niveles digitales (DN) proporcionales a la radiancia recibida por el sensor en una imagen se convierten en valores de reflectancia, permitiendo la comparación entre imágenes.
2. Se han eliminado las zonas afectadas por nubes o sombras, en las cuales la imagen tomada por el satélite no aporta una correcta información sobre la respuesta radiométrica de la cubierta vegetal (Figura 3).

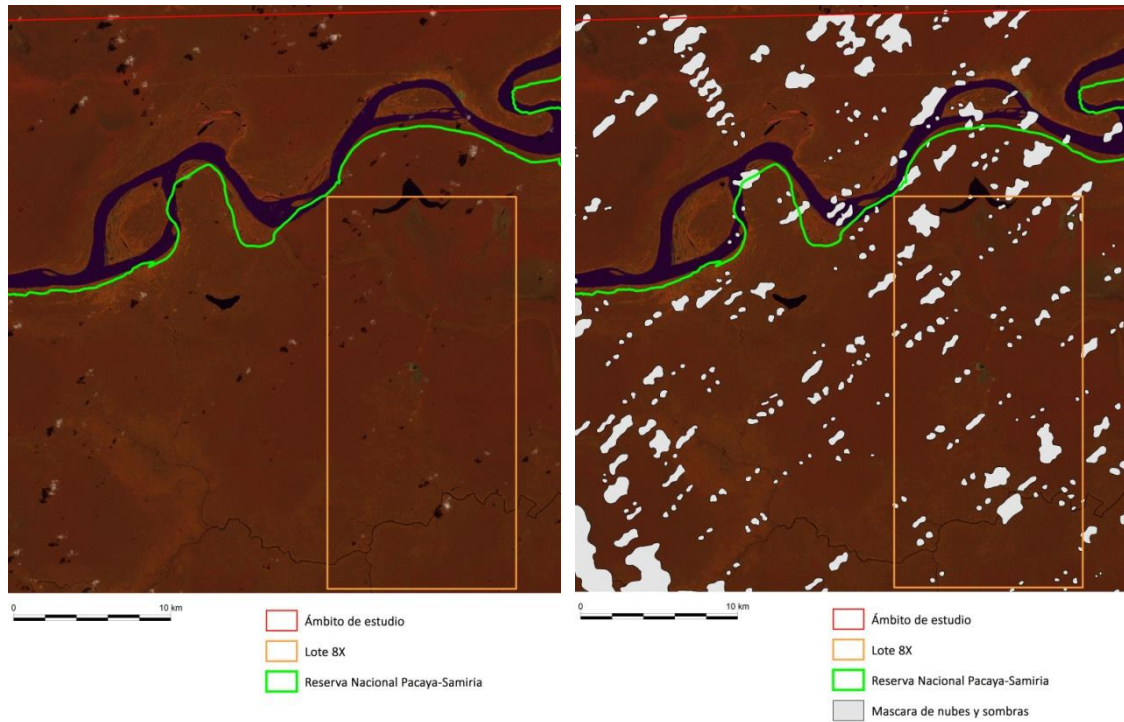


Figura 3-Máscara de nubes y sombras de la imagen Landsat del 14 de junio de 1989.

- Mediante el Índice de Agua Normalizado (NDWI) (McFeeters 1996) se han identificado y eliminado los cuerpos de agua, dado que estas zonas son muy variables en años correlativos, provocando grandes cambios en la respuesta radiométrica no atribuibles a la contaminación derivada de la industria extractiva.

$$NDWI_{i,j} = \frac{\rho_{i,j, GREEN} - \rho_{i,j, IRP}}{\rho_{i,j, GREEN} + \rho_{i,j, IRP}}$$

- Se ha optimizado la identificación de zonas correspondientes a cuerpos de agua incorporando el Índice de Agua Normalizado Modificado (MNDWI) (Xu 2006), que utiliza la banda correspondiente al infrarrojo medio en vez de la banda del infrarrojo cercano. La Figura 4 muestra el resultado de la aplicación de una máscara para los cuerpos de agua según el criterio descrito anteriormente.

$$MNDWI_{i,j} = \frac{\rho_{i,j, GREEN} - \rho_{i,j, IRM}}{\rho_{i,j, GREEN} + \rho_{i,j, IRM}}$$

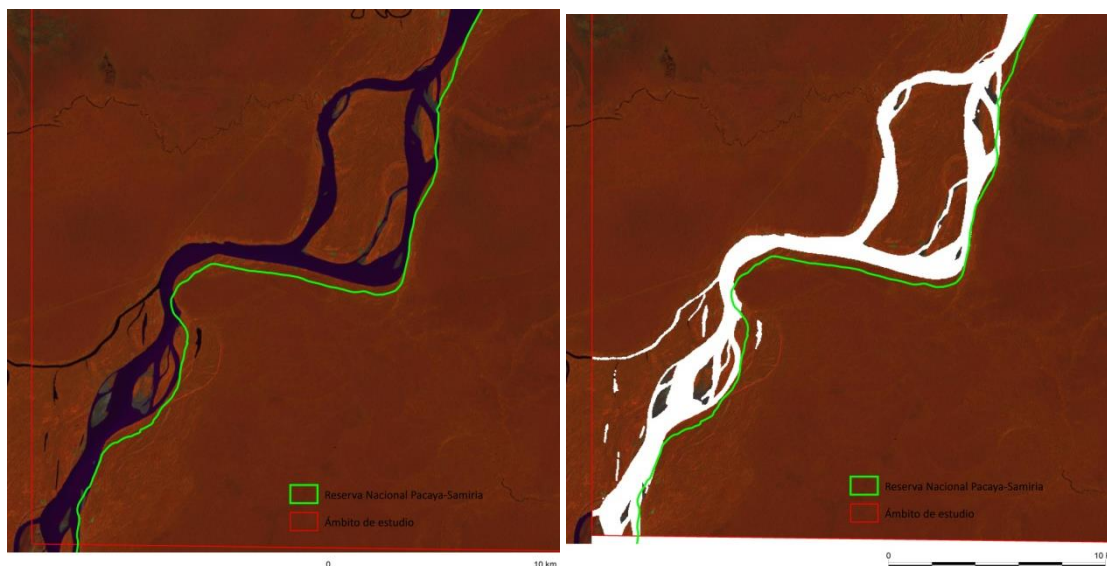


Figura 4-Resultado de la aplicación de la máscara de agua obtenida por la suma de los métodos NDWI y MNDWI en la imagen Landsat del 21 de octubre del 2001.

Una vez realizadas estas correcciones y habiendo eliminado las zonas no aptas para el estudio del desarrollo de la vegetación, se ha calculado el NDVI para cada una de las fechas a partir de las bandas del rojo e infrarrojo cercano.

$$NDVI_{ij} = \frac{\rho_{i,j,IRP} - \rho_{i,j,R}}{\rho_{i,j,IRP} + \rho_{i,j,R}}$$

Se han delimitado las áreas deforestadas iniciales a partir de la selección de píxeles con valores de NDVI inferiores a 0.7 de la imagen del 6 de agosto de 1985, la primera de la serie temporal.

Para comparar las imágenes de NDVI entre ellas y con el objetivo de minimizar las diferencias en el NDVI debidas a la estacionalidad o a la cantidad de precipitación recibida previamente al paso del satélite, los valores de NDVI han sido ponderados restándoles el valor promedio del NDVI de la zona de estudio para esa misma fecha.

A continuación se han calculado las diferencias del NDVI ponderado entre las diferentes fechas. Dichas diferencias permiten detectar las zonas donde el NDVI presenta un incremento positivo o negativo respecto a la imagen anterior. Debido a que previamente el NDVI ha sido ponderado restándole a cada píxel la media del NDVI del conjunto de la imagen, se ha podido limitar las variaciones en la producción primaria debidas a la climatología y resaltar las zonas en las que la respuesta de la vegetación difiere del comportamiento del NDVI del resto de la cobertura vegetal.

Se han delimitado la zonas donde la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación presentan variaciones significativas mediante la selección de los valores en que la diferencia en NDVI sobrepasan los umbrales mínimos y máximos determinados para cada caso. De esta manera se han podido seleccionar tanto las áreas en las cuales el NDVI presentaba un incremento negativo como aquellas en las que el índice presentaba un crecimiento fruto de un proceso de

reforestación o del crecimiento de plantas herbáceas en un terreno deforestado previamente. En ambos casos las zonas seleccionadas corresponden a áreas que han sufrido algún tipo de alteración en su cobertura vegetal.

Los umbrales se han determinado visualizando directamente sobre la imagen el resultado de la selección, de manera que fueran seleccionadas áreas compactas. Por encima de este umbral quedan seleccionados un gran número de píxeles aislados y distribuidos por todo el territorio, mientras que por debajo del umbral parte de las zonas compactas y visiblemente afectada por procesos de deforestación quedan fuera de la selección.

Aunque el estudio de zonas que han mostrado un incremento significativo de su producción primaria se ha realizado el área de estudio descrita por la Figura 1, los resultados que se presentan en este informe se limitan al área adyacente a la batería y los oleoductos, incluyendo también el área comprendida entre la batería y la quebrada Yanayacu Grande, situada más al sur y hacia la cual hasta el año 1994 fluían todas las aguas de producción. La Figura 5 muestra el ámbito de estudio para el análisis de la variación de NDVI. En la presentación de resultados se ha considerado las áreas situadas en el interior de la RNPS y las situadas en el área de influencia.

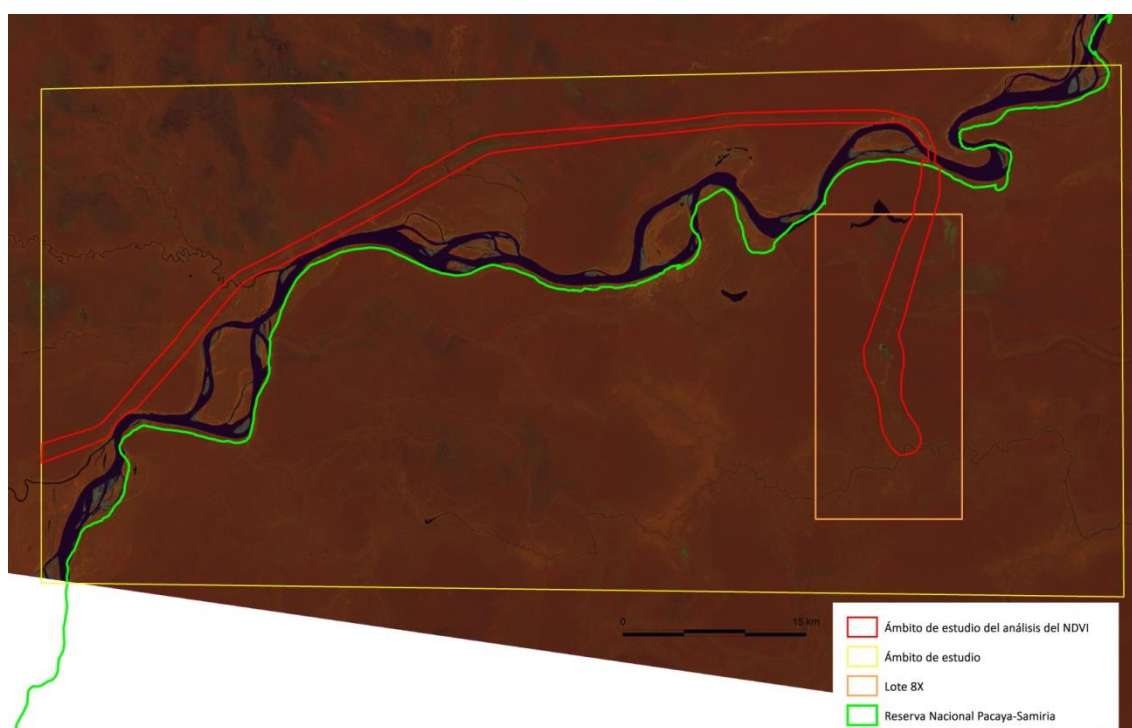


Figura 5.-Ámbito del estudio del análisis de la variación del NDVI en la RNPS.

3.1.2. Fotointerpretación de la superficie cubierta de petróleo en las inmediaciones de la batería de Yanayacu

Con la finalidad de estudiar la evolución de la superficie cubierta de petróleo en las inmediaciones de la batería de Yanayacu se han utilizado técnicas de fotointerpretación, que es el proceso mediante el cual se extrae la información contenida en una fotografía aérea o imagen de satélite. El área de estudio para este análisis es la zona contigua a la batería de Yanayacu,

incluyendo la laguna adyacente (sitios 1 y 3), dos lagunas de menor tamaño situadas al norte y noroeste (sitios 5 y 4, respectivamente) y el drenaje hacia la quebrada de Yanayacu Grande por la que hasta finales de los años 90 fluía el agua de producción. La Figura 6 corresponde a la fotografía aérea del Plan Ambiental Complementario del Lote 8 muestra la batería 3 del Lote 8X y las tres lagunas contaminadas.

Para realizar este análisis se ha utilizado la misma serie temporal de 17 imágenes Landsat consideradas en el estudio de las variaciones de producción primaria y una imagen de alta resolución del satélite SPOT de 5 metros que se ha usado con el objetivo de comparar los resultados obtenidos, ya que la imagen SPOT permite delimitar con mayor precisión la zona contaminada. Se ha comparado la imagen SPOT correspondiente al año 2007 con la imagen Landsat del mismo para determinar la fiabilidad de la metodología en función de la resolución espacial.

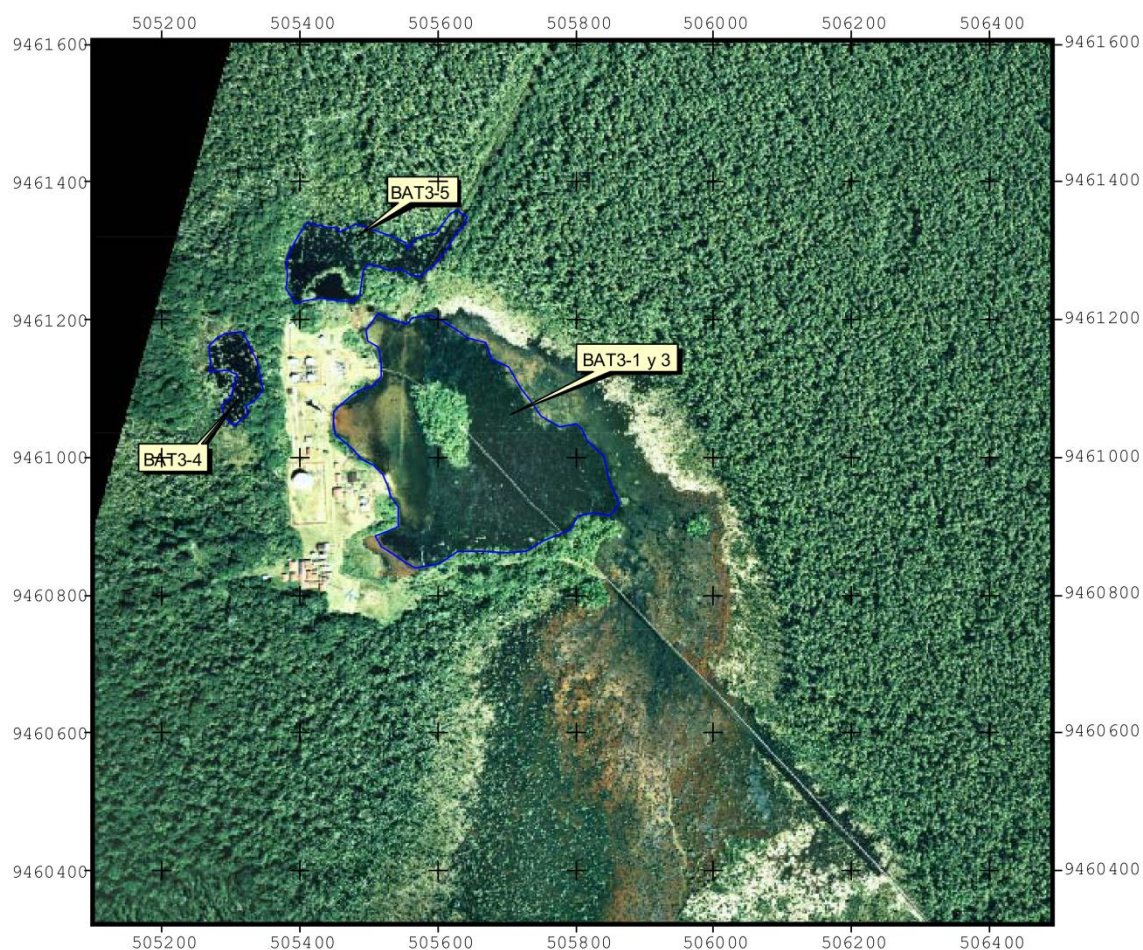


Figura 6-Fotografía aérea del PAC del Lote 8 donde se observa el área donde se ha realizado la fotointerpretación de la superficie cubierta por petróleo en las inmediaciones de la batería Yanayacu.

3.1.3. Clasificaciones mixtas

La clasificación de imágenes en teledetección responde a la idea que pueden establecerse límites más o menos precisos entre las respuestas espectrales de unos píxeles y otros, siendo estos límites los que definen las clases.

La clasificación en teledetección es un caso particular del problema general de clasificar N individuos procedentes de una muestra en un conjunto de $M < N$ clases en función de una serie de K variables ($X_1, X_2, \dots, X_K$). Este problema se resuelve en dos fases:

1. Determinación del número de clases y de las propiedades de éstas en relación a las K variables.
2. Asignar cada uno de los N individuos a una de las M clases utilizando una regla de decisión basada en las propiedades de los individuos y las clases en relación a las K variables.

En este caso se ha optado por realizar clasificaciones mixtas, consistentes en realizar primero una clasificación no supervisada de la imagen para, a partir de esta primera clasificación, realizar una segunda clasificación con las áreas de entrenamiento que hemos establecido previamente.

Para llevar a cabo este estudio se ha optado por una clasificación no supervisada de tipo Isodata. En esta clasificación el propio programa clasifica automáticamente todos los píxeles de la imagen en N clases en función de ciertos parámetros como son el número de bandas, el umbral de convergencia, el número máximo de iteraciones, el número mínimo de píxeles por clase, la similitud mínima entre clases, etc.

De la multitud de clases resultantes de la clasificación no supervisada, en una nueva clasificación supervisada a partir de un área de entrenamiento definida previamente, el programa analiza la respuesta espectral de dichas áreas para clasificar cada píxel de la imagen en una de estas categorías. El programa permite imponer ciertos umbrales de fidelidad y representatividad de los cuales dependerá el resultado, quedando sin clasificar todos aquellos píxeles en los cuales la respuesta espectral no se asemeje lo suficiente a la de los píxeles que conforman las áreas de entrenamiento.

El ámbito sobre el cual se han realizado clasificaciones mixtas corresponde a una franja de unos 9,5 km de ancho y comprende desde la orilla septentrional del río Marañón hasta la quebrada de Yanayacu Grande. El ámbito también incluye el oleoducto Nor-Peruano, situado al norte del río Marañón en el área de influencia de la RNPS (Figura 7).

El objetivo principal de las clasificaciones propuesto ha sido discriminar entre las superficies completamente cubiertas por petróleo, vertido, zonas con vegetación contaminadas, cochas, ríos, vegetación sana y suelo desprovisto de vegetación.

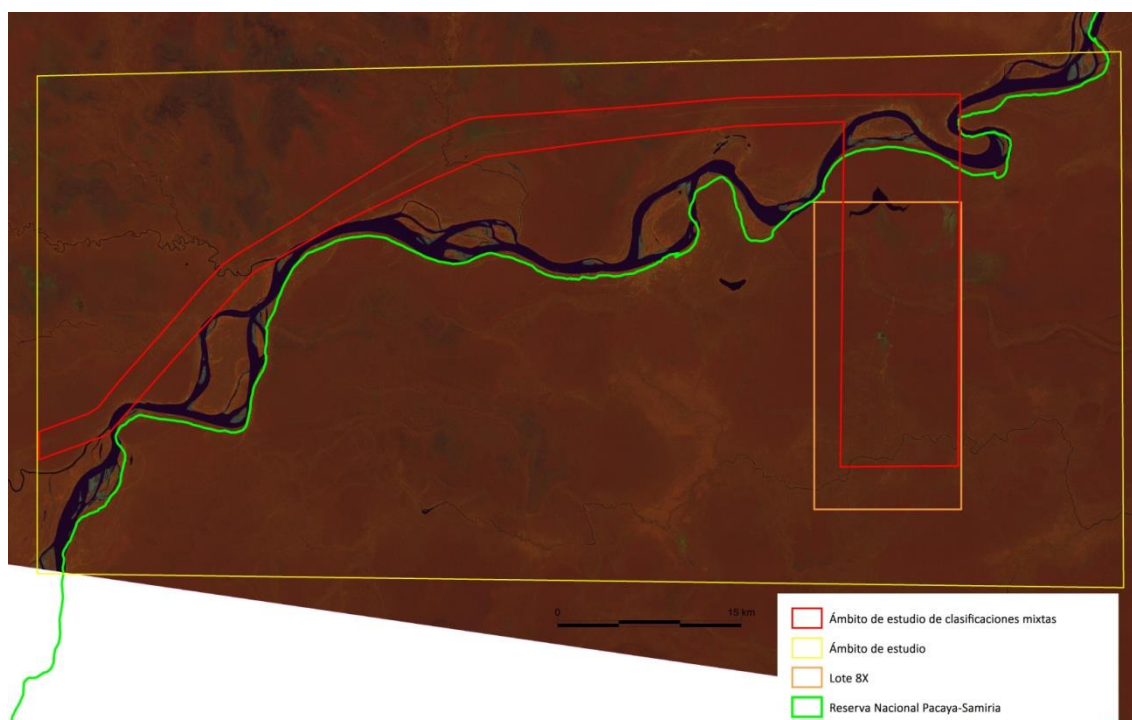


Figura 7. Ámbito de estudio de las clasificaciones mixtas.

3.1.4. Cálculo de kilómetros de líneas de prospección sísmica

Estudios realizados anteriormente en el Lote 1AB han demostrado que las prospecciones causan un impacto en la cubierta vegetal (Muñoa *et al.* 2015). De acuerdo con los resultados obtenidos en dicho estudio durante las prospecciones llevadas a cabo en el año 1996, para 144 km de líneas de prospección sísmica, se deforestaron un total de 16,74 hectáreas. La **Error! Reference source not found.** muestra las líneas sísmicas y las áreas deforestadas mencionadas.

Debido a que dichas prospecciones en la RNPS se realizaron en la década de los años 70, la deforestación que comportan dichas actividades no ha podido ser percibida mediante el análisis de las imágenes Landsat entre los años 1985 y 2007. Consecuentemente, se calculó la longitud de las líneas de prospección sísmica en el interior de la RNPS a partir de las capas oficiales de líneas de prospección sísmica peruanas.

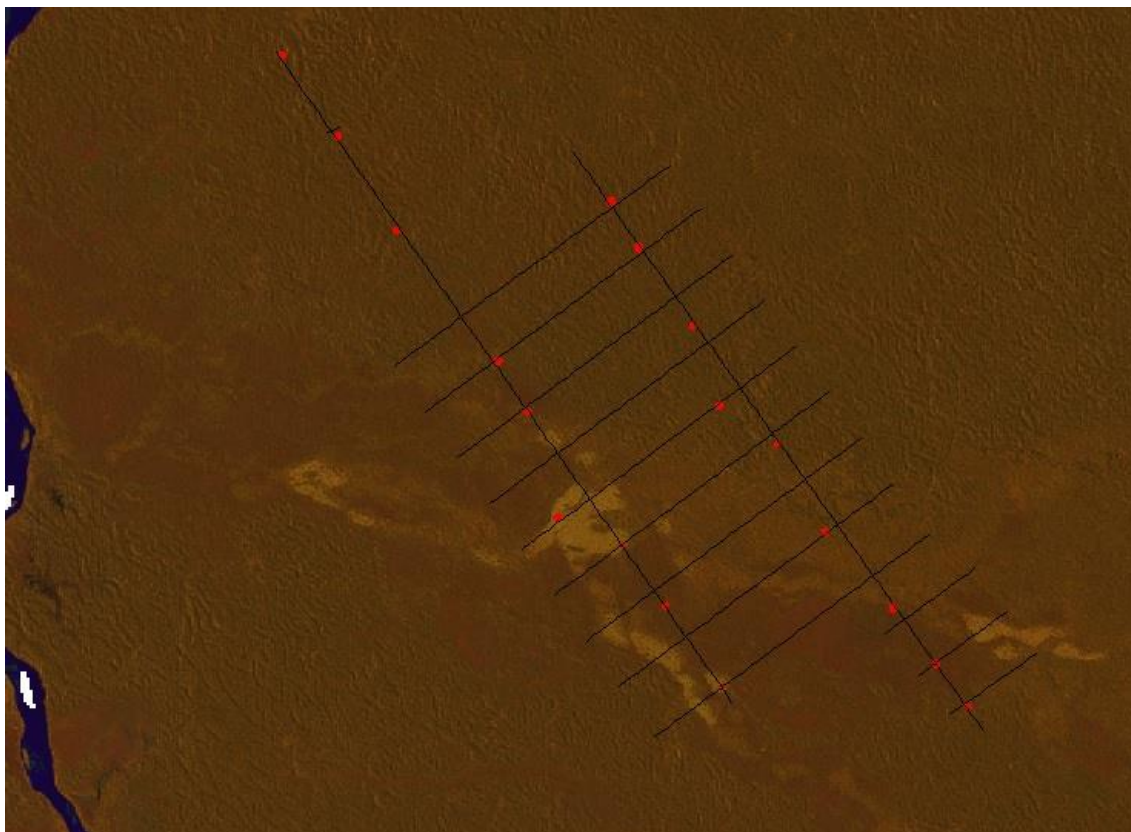


Figura 8- Líneas de prospección sísmica PLUGRG96L54 y áreas deforestadas en el Lote 1AB.

4. RESULTADOS

4.1 EFECTO BATERÍA SOBRE EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN

El análisis estadístico de particiones recursivas (CART, árboles de clasificación y regresión) muestra qué factores (año, estación climática, cuenca fluvial y posición relativa de la muestra - aguas arriba o abajo-) son estadísticamente más influyentes para determinar las concentraciones de cada compuesto químico analizado en muestras de agua (Tabla 3) y muestras de suelo (Tabla 4).

4.1.1 Efecto de la Batería nº3 sobre el nivel de contaminación en cursos fluviales

El análisis CART no se ha llevado a cabo para aquellos compuestos químicos cuya totalidad de datos disponibles corresponde a LDs (Antimonio, Acenaftileno, Acenafteno, Benzo(a) antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b) fluoranteno, Benzo(g,h,i) perileno, Criseno, Dibenzo(h,a) antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3,c,d)pireno, Benzo(e)pireno, Pireno y Plata). El análisis muestra que los factores considerados (año, estación climática, cuenca fluvial y posición relativa de la muestra) explican menos del 15% de la varianza del arsénico y el cadmio. Los árboles de regresión de los compuestos químicos cuyo modelo estadístico explica más del 15% de su varianza se muestran en el Anexo 6.

Los árboles de regresión muestran el año de colecta como principal factor que explica la variación de la concentración de los compuestos analizados. En el caso de TPHs el año de colecta de muestra es la única variable que explica la variación (Tabla 3). La Figura 9 muestra de forma simplificada el gradiente de concentraciones en función del año de colecta. Es importante destacar que sólo los compuestos aceites y grasa, bario, conductividad, cloruros y plomo han sido colectados con cierta homogeneidad durante el período de estudio. Los primeros análisis de cromo total, níquel y TPHs se realizan en el año 2006; y el análisis de cromo VI sólo se realizó entre los años 1997 y 2000. Esta circunstancia dificulta la interpretación del efecto que el cambio del manejo de las aguas de producción tuvo sobre la calidad del agua de los ríos.

La ubicación de la muestra aguas abajo respecto al vertido de agua producida es el segundo factor más importante para explicar la variación de las concentraciones de siete compuestos químicos (grasas, conductividad, cloruros, cromo total, cromo hexavalente y fenoles); por lo tanto, en todos estos compuestos se sugiere que la diferencia de concentración es debido al efecto de la batería sobre el curso de agua. En el caso concreto del níquel, las concentraciones de este compuesto son menores aguas abajo respecto a aguas arriba. La estacionalidad aparece como otro factor importante para explicar la variación de las concentraciones de cromo hexavalente (1er factor), bario, cromo total, mercurio, plomo (2º factor), grasas y conductividad (3er factor). La cuenca de procedencia de la muestra sólo aparece como factor determinante en la variación en el caso de los aceites y grasas y el bario (3er factor).

La cuenca de procedencia de la muestra sólo aparece como factor determinante en la variación en el caso de grasas, bario y sulfuros.

Año	Aceites y grasas (n= 351)	Bario (n= 347)	Conductividad (n= 83)	Cloruros (n= 337)	Cromo total (n= 141)	Cromo VI (n= 46)	Fenoles (n= 129)	Mercurio (n=187)	Níquel (n= 59)	Plomo (n= 353)	TPHs (n= 143)
1994											
1995											
1996											
1997											
1998											
1999											
2000											
2001											
2002											
2003											
2004											
2005											
2006											
2007											
2008											
2009											
2010											
2011											
2012											
2013											
2014											
2015											

Figura 9- Clasificación de las concentraciones en agua en función del valor promedio por año de análisis. El número de muestras representa solo a selección de muestras aptas para el estudio estadístico. El criterio de coloración es cualitativo, según grupos de años con valores medios estadísticamente distintos: Los compuestos cuyo árbol tiene solo dos grupos (níquel, cloruros, cromo, fenoles, y conductividad) aparecen en dos colores, el más oscuro indica mayor concentración y el más claro menor concentración sin atender diferencias numéricas. Un compuesto con más de dos grupos muestra el mismo número de colores que de grupos, y la coloración los ordena solo en sentido cualitativo. No hay relación entre compuestos, un mismo color en dos compuestos no indica similar concentración. Los espacios sin color indican ausencia de datos colectados durante ese año

Legenda:



Compuesto	Decreto Supremo- Nº002-2008- MINAM. Categoría 4 Ríos de Selva	Varianza explicada (%)	N	Factor 1		Factor 2 (concentración en mg/l)	Otros factores (concentración en mg/l)
				Grupo con mayor valor promedio (concentración en mg/l)	Grupo con menor valor promedio (concentración en mg/l)		
Aceites y grasas	--	67	351	1996-2000;2002 (3,860)	2001;2003-2008; 2010-2013(0,6590)	Ubicación AB(5.60); ARR (2.11)	-Cuenca H-S(10.21);M (3.81) -Época C(2.97); T,V(1.90)
Mercurio	0,0001	64	187	1996-2000; 2012-2013 (0,0003)	2006-2008 ;2010-2011 (0,0001)	Época C-V (0.00043) ;T(0.00029)	--
Cloruros	--	58	337	1996 y 1997 (229,0)	1998-2008;2010-2013 (13,2)	Ubicación AB(458); ARR (37.7)	--
Cromo total	--	58	141	1996;2007 (0,0138)	2006;2008;2010-2013 (0,0027)	Época C (0.0044);T-V(0.003)	Ubicación ARR(0.00286);AB(0.004)
Bario	1	57	347	2000-2002 (0,2990)	1996-1999;2003-2006 ;2008;2010-2013 (0.096)	Época V(0.889);C-T(0.157)	cuenca M(0.0852); H-S(0.019)
Conductividad*	--	47	83	1996-1997 (822,6)	1998-2000;2004; 2006;2013(175,8)	Ubicación AB(1612.0); ARR (164.6)	Época C-T(194.2); V(130.6)
Fenoles	0,001	44	129	1997-1999 (0,0110)	1996;2000;2006; 2008;2010-2012 (0,0007)	Ubicación AB(0.0146); ARR(0.0075)	--
TPHs	--	40	143	2006;2008 (0,0740)	2007;2010-2013 (0,0208)	2007,2013 (0.0256); 2010,2011,2012 (0.020)	--
Cromo VI	0,05	29	46	Época C (0,0437)	Época T-V (0,0098)	Ubicación AB (0.0134); ARR(0.0062)	Año 1997;2000 (0.0155); 1998;1999 (0.01)
Níquel	0,025	22	59	2006;2012 (0,0118)	2011;2013 (0,0015)	Ubicación ARR(0.0143); AB (0.0096)	--
Plomo	0,001	22	353	1996-1998;2000-2002; 2013(0,00982)	1999;2003-2008; 2010-2012(0,0029)	Época C (0.0143); T-V (0.0072)	--

Tabla 3- Factores que distinguen estadísticamente a los valores en muestras de agua. Se muestra para el factor principal los valores medios de los grupos y los subgrupos que la conforman. Entre paréntesis se muestra la concentración promedio de cada grupo expresadas en mg/l. El número de muestras representa solo a selección de muestras aptas para el estudio estadístico.

*Compuestos con unidades distintas: $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Conductividad)

Abreviaciones: M: Maraón. S: Samiria. H: Huistoyanayaquillo. T: Época de transición. C: Época de creciente. V: Época de vaciante. ARR: grupo ubicado aguas arriba del punto de vertido. AB: grupo ubicado aguas abajo del punto de vertido.

4.1.2 Resultados del análisis estadístico en muestras de suelos.

El análisis CART no se ha llevado a cabo para aquellos compuestos químicos cuya totalidad de datos disponibles corresponde a LDs (Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno, Benzo(a) antraceno, Indeno (1, 2, 3, c, d) pireno y antraceno).

Los árboles de regresión muestran que el factor principal para explicar la varianza de las concentraciones de los compuestos químicos en muestras de suelos es la distancia del punto de muestreo a la batería; siendo, en el caso concreto del cerio, litio, cromo total, estroncio, molibdeno, níquel y titanio, el único factor determinante.

La Figura 10 muestra cómo las concentraciones de los compuestos químicos (arsénico, cromo total, cobre, mercurio, molibdeno, plomo, estroncio y TPHs) disminuyen a medida que la distancia de colecta aumenta (>133 m). Son una excepción el caso del litio, níquel, titanio y vanadio, compuestos cuyas aumentan en muestras colectadas lejos de la batería (>329 m).

El factor cuenca permite explicar diferencias sólo en el caso de cobalto y estaño, mientras que el factor año de colecta de muestra es determinante en el caso de cadmio, mercurio y plomo para un rango superior a 154 m, si bien los años de análisis son recientes y no muy diversos (1997, 2012, 2013, 2014 y 2015).

Nombre	Varianza explicada %	N	Factor principal. Grupo 1	Factor principal grupo 2	Factores dentro del grupo 1	Factores dentro del grupo 2
Cobalto	63	30	cuenca Samiria (2,7)	cuenca Maraón – Huisto (8,9)		
Níquel	59	30	hasta 1508 m (4,7)	desde 1508m (12,6)		
Titanio	53	25	hasta 329 m (50,6)	desde 329 m(211,6)		
Estroncio	39	25	hasta 298 m (295,9)	desde 298 m (31,8)		
Bario	39	82	hasta 117 m (2500)	desde 117 m (275,2)	2012;2013 (343) 2014,2015 (3295)	1997,2012,2013 (115.4) 2015(395)
Arsénico	35	77	hasta 154m (22)	desde 154 m (7,2)	hasta 110 m (5,2) desde110 m (12.1)	
Vanadio	32	30	hasta 298 m (22)	desde 298 m (42)		
Litio	30	25	hasta 1508 m (6,13)	desde 1508 m (10,71)		
TPHs C10-C28	24	51	hasta 175 m(7252)	desde 175m (2033)	hasta 102 m(2993) desde 102 m(12167)	hasta 328m (3680) desde 328m (237)
Cadmio	24	82	2012,2014,2015 (1,08)	1997,2013 (2,98)	desde155m (0,61) hasta 155m (1,51)	hasta 261m (2,3) desde 261m (4,9)
Mercurio	2235	8277	1997,2012,2013 (0,11)	2014,2015 (0,46)	hasta 329 m (0,20) desde 329m (0,031)	hasta 155m (0,55) desde 155m(0,36)
Plomo	2139	8282	hasta 154 m (116,8)	desde 154 m(35,8)	hasta 84 m(58,2) desde 84m (155)	1997,2012,2013 (14,6) 2015 (56)
Cromo total	1924	3182	hasta 133m (83,1)	desde 133m (12,69)		hasta 329m (7,8); desde 329m (14.7)
Molibdeno	1663	3030	hasta 133 m (0,512)	desde 133 m (0,26)		hasta 61,9 km (0,23) desde 61,9 km(0,30)

Tabla 4- Factores que distinguen estadísticamente a los valores en muestras de suelo. Se muestra para el factor principal los valores medios de los grupos y los subgrupos que la conforman. Entre paréntesis se muestran la concentración promedio de cada grupo.

Distancia (m)	Arsénico (77)	Bario (82)	Cadmio (82)	Cobalto (30)	Cromo total (31)	Mercurio (82)	Litio (82)	Molibdeno (30)	Níquel (30)	Plomo (82)	Estroncio (25)	Titanio (25)	Vanadio (30)	TPHs C10-C28 (51)
84														
90														
102														
110														
117														
133														
155														
175														
261														
298														
328														
453														
1508														
49300														
61000														

Figura 10 - Clasificación de las concentraciones en suelos en función de la distancia a la fuente de contaminación más cercana. El criterio de coloración es cualitativo, según rangos de distancia con valores medios estadísticamente distintos: Los compuestos cuyo árbol tiene solo dos grupos aparecen en dos colores, el más oscuro indica el rango de distancia con mayor concentración y el más claro el de menor, sin atender diferencias numéricas. Un compuesto con más de dos grupos muestra el mismo número de colores que de grupos, y la coloración los ordena solo en sentido cualitativo. No hay relación entre compuestos, un mismo color en dos compuestos no indica similar concentración. Los espacios sin color indican ausencia de datos colectados durante ese año

Leyenda:



4.2 NIVELES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL RESPECTO A LOS LÍMITES LEGALES

4.2.1 Comparación de valores ambientales en agua con los límites legales. Muestras de agua que superan los estándares legales nacionales e internacionales

Las normativas nacionales para calidad de agua de ríos de selva Decreto Supremo Nº 002-2008-MINAM Categoría 4: Ríos de Selva (Ministerio del Ambiente 2008) solo presentan los límites máximos permitidos de 8 (22.9%) de los 35 compuestos analizados en este estudio. y en suelos nueve de los treinta y nueve compuestos. Los límites legales de la normativa nacional son considerablemente más elevados en el caso del mercurio, cadmio, cromo y arsénico a los de la normativa a la normativa canadiense (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006). En el caso del fenol la legislación canadiense propone un límite máximo permitido mayor que la legislación nacional. Existe un mismo criterio en el caso del plomo.

La Tabla 5 muestra los límites legales y el porcentaje de muestras que superan a éste en cada una de las cuatro normativas estudiadas. Se observa un elevado número de compuestos químicos analizados que presentan valores que superan el límite de la normativa vigente - Decreto Supremo Nº 002-2008-MINAM Categoría 4: Ríos de Selva (Ministerio del Ambiente 2008). En el caso de las concentraciones de plomo y sulfuros, el 64.2% y el 50.0 % de las muestras de agua analizadas superan el límite legal, respectivamente (Tabla 4). Otros metales pesados que presentan un elevado el porcentaje de muestras de agua que superan los límites permitidos para fenoles (18.3%), cadmio (14.5%), cromo hexavalente (10.5%), y en menor medida por níquel, bario y arsénico.

Los compuestos poliaromáticos presentan menores niveles de contaminación, donde el 99.5% de las muestras analizadas presentan concentraciones en niveles no detectables.

COMPARACIÓN LÍMITES LEGALES EN MUESTRAS DE AGUA														
Base de Datos			Decreto Supremo-Nº002-2008-MINAM. Categoría 4 Ríos de Selva			Canadian Environmental Quality Guidelines			Decreto Supremo-Nº002-2008-MINAM. Categoría 1 Agua apta para potabilización			European Union standards for drinking water quality		
Compuesto	N total	N valores LD (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)
Plomo	374	208(56)	0,001	240(64,2)	84(22,5)	0,001	240(64,2)	84(22,5)	0,01	44(11,8)	0(0)	0,01	44(11,8)	0(0)
Mercurio	205	195(95)	0,0001	123(60)	117(57,1)	0,000026	205(100)	195(95,1)	0,001	0(0)	0(0)	0,001	0(0)	0(0)
Fenoles	142	107(75)	0,001	26(18,3)	0(0)	0,004	21(14,8)	0(0)	0,003	22(15,5)	0(0)	--	--	--
Cadmio	207	143(69)	0,004	30(14,5)	14(6,8)	0,00009	204(98,5)	140(67,6)	0,003	36(17,4)	14(6,8)	0,005	15(7,2)	0(0)
Cromo VI	57	17(30)	0,05	6(10,5)	0(0)	0,001	38(66,7)	0(0)	0,05	6(10,5)	0(0)	--	--	--
Níquel	63	38(60)	0,025	4(6,3)	0(0)	0,025	4(6,3)	0(0)	0,02	4(6,3)	0(0)	0,02	4(6,3)	0(0)
Arsénico	127	112(88)	0,05	2(1,6)	0(0)	0,005	9(7,1)	0(0)	0,01	5(3,9)	0(0)	0,01	5(3,9)	0(0)
Bario	365	107(29)	1	4(1,1)	0(0)	--	--	--	0,7	12(3,3)	0(0)	--	--	--
Cromo total	148	91(61)	--	--	--	--	--	--	0,05	0(0)	0(0)	0,05	0(0)	0(0)
Estroncio	29	0(0)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Aceites y grasas	393	265(67)	--	--	--	--	--	--	1	132(33,6)	8(2)	--	--	--
Antimonio	29	29(100)	--	--	--	--	--	--	0,006	0(0)	0(0)	0,005	0(0)	0(0)
Berilio	31	27(87)	--	--	--	--	--	--	0,004	0(0)	0(0)	--	--	--
Boro	29	11(38)	--	--	--	1,5	0(0)	0(0)	0,5	0(0)	0(0)	1	0(0)	0(0)
Conductividad*	107	0(0)	--	--	--	--	--	--	1500	7(6,5)	0(0)	--	--	--
Cloruros	355	0(0)	--	--	--	120	19(5,4)	0(0)	250	10(2,8)	0(0)	--	--	--
Cobalto	29	18(62)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Litio	29	23(79)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
TPHs	167	151(90)	--	--	--	--	--	--	0,05	42(25,1)	24(14,4)	--	--	--
Vanadio	31	9(29)	--	--	--	--	--	--	0,1	0(0)	0(0)	--	--	--
Naftaleno	10	7(70)	--	--	--	0,0011	0(0)	0(0)	--	--	--	--	--	--
Acenafileno	39	39(100)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Acenafeno	39	39(100)	--	--	--	0,0058	0(0)	0(0)	--	--	--	--	--	--
Benzo(a) antraceno	34	39(100)	--	--	--	0,000018	5(9)	0(0)	--	--	--	--	--	--
Benzo(a)pireno	39	39(100)	--	--	--	0,000015	7(17,9)	7(17,9)	0,0007	0(0)	0(0)	0,00001	7(17,9)	0(0)
Benzo(b) fluoranteno	39	39(100)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Benzo(g,h,i) perileno	39	39(100)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Criseno	39	39(100)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

COMPARACIÓN LÍMITES LEGALES EN MUESTRAS DE AGUA														
Base de Datos			Decreto Supremo-Nº002-2008-MINAM. Categoría 4 Ríos de Selva			Canadian Environmental Quality Guidelines			Decreto Supremo-Nº002-2008-MINAM. Categoría 1 Agua apta para potabilización			European Union standards for drinking water quality		
Compuesto	N total	N valores LD (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)
Dibenzo(h,a) antraceno	39	39(100)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Fenantreno	39	39(100)	--	--	--	0,0004	0(0)	0(0)	--	--	--	--	--	--
Fluoranteno	39	39(100)	--	--	--	0.00004	7(17.9)	7(17.9)	--	--	--	--	--	--
Fluoreno	39	39(100)	--	--	--	0.003	0(0)	0(0)	--	--	--	--	--	--
Indeno(1,2,3,c,d)pireno	39	39(100)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Benzo(e)pireno	39	39(100)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Pireno	39	39(100)	--	--	--	0.000025	7(17.9)	7(17.9)	--	--	--	--	--	--

Tabla 5- Comparación de los valores ambientales en agua con los límites legales nacionales establecidas por el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categorías 4: Ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008) y Categoría 1: Agua apta para potabilización con desinfección; la normativa canadiense “Canadian Environmental Quality Guidelines, Chapter Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Category Freshwater” (Canadian Council of Ministers of the Environment 2001) y la normativa europea “Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998. On the quality of water intended for human consumption” (Council of the European Union 1998). Los porcentajes de valores estándar y valores LD superiores al límite legal se muestran entre paréntesis y se han calculado sobre el número total de muestras.

*Compuestos con unidades distintas: $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Conductividad)).

LD—Límite de detección o concentración mínima detectable según el método de análisis.

4.2.2 Comparación de valores ambientales en suelo con los límites legales. Muestras de suelo que superan los estándares legales nacionales e internacionales

Las normativas nacionales para calidad de suelos Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM Suelo residencial/parques (Ministerio del Ambiente 2013) solo presentan los límites máximos permitidos de 9 (25.7%) de los 35 compuestos analizados en este estudio. Los límites legales de la normativa nacional son similares a los de la normativa a la normativa canadiense (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006), excepto en el caso del arsénico donde la legislación canadiense propone un límite máximo permitido considerablemente menor que la legislación nacional.

De los 9 compuestos químicos con límites legales establecidos por la normativa nacional, ocho (excepto el mercurio) han presentado concentraciones que superan el límite legal, destacando el alto porcentaje de TPHs de 10 a 28 carbonos (51%), de 28 a 40 carbonos (28 %), bario (19.2 %) y plomo (13.3 %) (Tabla 6).

COMPARACIÓN LÍMITES LEGALES EN MUESTRAS DE SUELO								
Base de datos			Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM. Suelo residencial /parques			Canadian Soil Quality Guidelines. Suelo residencial		
Compuesto	N total	N valores LD (%)	Valor máximo permitido (mg/kg)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/kg)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)
TPHs C10-C28	100	7 (7)	1200	51(51)	0(0)	--	--	--
TPHs C28-C40	100	3 (3)	3000	28(28)	0(0)	--	--	--
Bario	120	1 (1)	500	23(19,2)	0(0)	500	23(19,2)	0(0)
Plomo	120	10 (8)	140	16(13,3)	0(0)	140	16(13,3)	0(0)
Cromo VI	69	65 (94)	0,4	4(5,8)	0(0)	0,4	4(5,8)	0(0)
Cadmio	120	65 (54)	10	6(5)	0(0)	10	6(5)	0(0)
TPHs C6-C10	100	84 (84)	200	5(5)	0(0)	--	--	--
Arsénico	115	22 (19)	50	1(0,9)	0(0)	12	6(5,2)	0(0)
Mercurio	120	79 (66)	6,6	0(0)	0(0)	6,6	0(0)	0(0)
Antimonio	39	6 (15)	--	--	--	20	0(0)	0(0)
Azufre	5	2 (40)	--	--	--	--	--	0(0)
Berilio	39	1 (3)	--	--	--	4	0(0)	0(0)
Boro	34	29 (85)	--	--	--	--	--	0(0)
Cobalto	39	1 (3)	--	--	--	50	2(5,1)	0(0)
Cromo total	40	0 (0)	--	--	--	64	2(5)	0(0)
Estroncio	34	0 (0)	--	--	--	--	--	--
Litio	34	3 (9)	--	--	--	--	--	--
Molibdeno	39	17 (44)	--	--	--	10	0(0)	0(0)
Níquel	39	1 (3)	--	--	--	50	0(0)	0(0)
Talio	39	30 (77)	--	--	--	1	8(20,5)	0(0)
Titanio	34	0 (0)	--	--	--	--	--	--
TPHs	22	3 (14)	--	--	--	--	--	--
Vanadio	39	0 (0)	--	--	--	130	0(0)	0(0)
Naftaleno	45	45 (100)	--	--	--	--	--	--
Acenaftileno	45	45 (100)	--	--	--	--	--	--
Acenafteno	45	45 (100)	--	--	--	--	--	--
Fluoreno	45	43 (96)	--	--	--	--	--	--
Fenantreno	45	41 (91)	--	--	--	--	--	--

COMPARACIÓN LÍMITES LEGALES EN MUESTRAS DE SUELO								
Base de datos			Decreto Supremo Nº 002-2013-MINAM. Suelo residencial /parques			Canadian Soil Quality Guidelines. Suelo residencial		
Compuesto	N total	N valores LD (%)	Valor máximo permitido (mg/kg)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)	Valor máximo permitido (mg/kg)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)
Antraceno	45	45 (100)	--	--	--	--	--	--
Fluoranteno	45	44 (98)	--	--	--	--	--	--
Pireno	45	41 (91)	--	--	--	--	--	--
Benzo(a) antraceno	45	45 (100)	--	--	--	--	--	--
Criseno	45	40 (89)	--	--	--	--	--	--
Benzo(a) Fluoranteno	45	43 (96)	--	--	--	--	--	--
Benzo(k) Fluoranteno	45	43 (96)	--	--	--	--	--	--
Benzo(a)pireno	45	42 (93)	--	--	--	--	--	--
Dibenzo(a,h) Antraceno	45	44 (98)	--	--	--	--	--	--
Benzo(g,h,i) Perileno	45	44 (98)	--	--	--	--	--	--
Indeno(1,2,3,c,d)Pireno	16	16 (100)	--	--	--	--	--	--

Tabla 6- Comparación de valores ambientales en muestras de suelo con los límites legales del Decreto Supremo Nº 002-2013-MINAM (Ministerio del Ambiente 2013).y la normativa canadiense "Canadian Soil Quality Guidelines. Residential soil" (Canadian Council of Ministers of the Environment 2006). Los porcentajes de valores estándar y valores LD superiores al límite legal se muestran entre paréntesis y se han calculado sobre el número total de muestras. También se han representado los porcentajes de muestras que son LD y que a su vez superan el límite legal.

4.2.3 Comparación de valores de agua y suelo en periodo de la normativa actual

El porcentaje de muestras de agua y suelos colectadas a partir del año 2008 que superen los límites legales son considerablemente menores a los porcentajes establecidos considerando la totalidad de muestras (Tabla 7 y Tabla 8). Plomo (33.3%) es el compuesto analizado con mayor porcentaje de muestras de agua que superan los límites legales. Aunque el mercurio presente un 45% de muestras de agua sobre los límites permitidos, el 93.8% de las concentraciones se encuentran son LD.

En el caso de muestras de suelos, ningún valor LD supera el límite legal, por lo tanto, el LD no afecta a la interpretación de resultados. Se observó un alto porcentaje de muestras de suelo que supera el límite legal en TPHs de 10 a 28 carbonos (51.0%) y de 28 a 40 carbonos (28.0%), y de bario (18.4%) y plomo (13.2%) (Tabla 8).

COMPARACIÓN MUESTRAS DE AGUA DEL PERIODO 2008-2015 CON LÍMITES LEGALES					
Base de datos 2008-2015			Decreto Supremo-Nº002-2008- MINAM. Categoría 4 Ríos de Selva (mg/l)		
Compuesto	N total	N valores LD (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)
Mercurio	129	121(94)	0,0001	58(45,0)	53(41,1)
Plomo	132	87(66)	0,001	40(30,3)	1(0,8)
Níquel	61	38(62)	0,025	4(6,6)	0(0,0)
Arsénico	123	111(90)	0,05	2(1,6)	00(0,0)
Cadmio	129	112(87)	0,004	1(0,8)	(0,0)
Bario	129	2(1)	1	0(0,0)	0(0,0)
Fenoles	94	94(100)	0,001	0(0,0)	0(0,0)

COMPARACIÓN MUESTRAS DE AGUA DEL PERIODO 2008-2015 CON LÍMITES LEGALES					
Base de datos 2008-2015			Decreto Supremo-Nº002-2008- MINAM. Categoría 4 Ríos de Selva (mg/l)		
Compuesto	N total	N valores LD (%)	Valor máximo permitido (mg/l)	N Valores mayores que el límite legal (%)	N Valores LD mayores que el límite legal (%)
Cromo VI	0	0 (0)	0,05	0(0.0)	0(0.0)

Tabla 7- Comparación de los valores ambientales de agua analizados entre 2008 y 2015 con los límites legales nacionales establecidos por el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4 ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008). Los porcentajes de valores estándar y valores LD superiores al límite legal se muestran entre paréntesis y se han calculado sobre el número total de muestras. También se han representado los porcentajes de muestras superan el límite legal y que a su vez son LD.

COMPARACIÓN MUESTRAS DE SUELO DEL PERIODO 2013-2015 CON LOS LÍMITES LEGALES					
Base de datos 2013-2015			Valor del límite legal Decreto Supremo Nº 002-2013-MINAM ECA suelo residencial /parques		
Compuesto	N total	N valores LD	Valor máximo permitido (mg/kg)	% Valores mayores que el límite legal	% Valores LD mayores que el límite legal
Arsénico	114	22 (19)	50	10(0.9)	0(0.0)
Bario	114	0 (0)	500	21(18.4)	0(0.0)
Cadmio	114	53 (46)	10	6(5.2)	0(0.0)
Cromo VI	69	65(94)	0.4	4(5.8)	0(0.0)
Mercurio	119	78(65)	6,6	0(0.0)	0(0.0)
Plomo	119	9 (7)	140	16(13,2)	0(0.0)
TPH C10-C28	100	7 (7)	1200	51(51.0)	0(0.0)
TPH C28-C40	100	3 (3)	3000	28(28,0)	0(0.0)
TPH C6-C10	100	84 (84)	200	5(5.0)	0(0.0)

Tabla 8- Comparación de los valores ambientales de suelos analizados entre 2013 y 2015 con los límites legales nacionales, de acuerdo al Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial (Ministerio del ambiente 2013). Los porcentajes de valores estándar y valores LD superiores al límite legal se muestran entre paréntesis y se han calculado sobre el número total de muestras. También se han representado los porcentajes de muestras superan el límite legal y que a su vez son LD.

LD—Límite de detección o concentración mínima detectable según el método de análisis.

4.3 RESULTADOS CLASIFICADOS POR COMPUESTO

4.3.1 Aceites y grasas

Los aceites y grasas solo se han recopilado en muestras de agua y con un total de 393 valores, de los que un 67% son valores LD. La normativa aplicable en la RNPS (Ministerio del Ambiente 2008) no impone límite legal en aceites y grasas, y solo demanda que no exista película visible en la superficie del agua. Por lo tanto, la comparación con los límites legales en agua solo es posible con la categoría 1: Agua apta para potabilización, del Decreto Supremo N° 002-2008. MINAM (Ministerio del Ambiente 2008), aunque somos conscientes del error contextual. El 33.6% de las muestras superan este límite legal.

El árbol de regresión (Anexo 6, Figura 1) para aceites y grasas en muestras de agua explica el 67% de la varianza y distingue estadísticamente varios factores que determinan las variaciones

de sus concentraciones. El más determinante es el año, con dos grupos: 1- muestras de los años 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, y 2002 (3.86 mg/l); 2- muestras posteriores al año 2001, 2003-2008; 2010-2013 (0.66 mg/l). En ambos grupos la estación del año aparece como factor determinante, siendo la estación de creciente la que presenta mayores concentraciones de aceites y grasas (Tabla 3). En el grupo de 1996-2002, antes de la reinyección de las aguas de producción en los pozos, las concentraciones de aceites y grasas con ubicación posterior al punto de vertido es mayor que antes el punto de vertido (5.60 mg/l y 2.12 mg/l, respectivamente). Entre las muestras colectadas tras el punto de vertido, las cuencas Samiria y Huistoyanayaquillo, presentan concentraciones mayores (10.21mg/l) respecto a la cuenca del Maraón (3.84 mg/l).

No hay datos de aceites y grasas en muestras de suelos y al no poseer límite legal en el Decreto Supremo Nº 002-2008. MINAM. Categoría 4; Ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008) no se ha creado mapa de distribución de la contaminación.

4.3.2 Arsénico

El arsénico se recopilaron 127 muestras de agua, de las que el 88.2% son valores LD y 115 muestras en suelo de las que el 19.1% son valores LD. Su límite legal vigente en muestras de agua (Ministerio del Ambiente 2008) es de 0.05 mg/l, y el 1.6% de muestras supera el límite legal. Se analizó también las concentraciones de 114 muestras en suelo, de las que el 17% son valores LD y el 0.9% de las muestras tiene concentraciones que superan el límite legal.

Entre 2008 y 2015 la comparativa de valores de aguas mantiene el 1.6 % sobre el límite de la legislación vigente. La N del arsénico en este periodo es de 123 muestras, 90 % de ellas son valores LD. Ningún valor LD supera el límite legal.

En suelos el periodo de vigencia de la actual normativa (Ministerio del Ambiente 2013) va desde 2013 a 2015. En suelos las muestras han sido 114 con 17% de valores LD, ninguno de estos sobre el límite legal. Entre 2013-2015 el arsénico en suelos se mantiene al 0.9% de valores sobre el límite.

El modelo estadístico no alcanza a explicar el 15% de varianza en aguas y no aporta información concluyente. En muestras de suelo las variaciones de sus concentraciones están explicadas por la distancia de la colecta de la muestra respecto al punto de vertido: antes de 154 m (7.27 mg/kg) y después (2.2 mg/kg).

En el arsénico en muestras de agua se observan solo dos muestras que superan el límite legal y se recogen en el Reporte mensual de diciembre 2010 de la empresa Pluspetrol Norte. Los mapas de distribución espacial (Figura 11) nos muestra que estas muestras se ubican a 500 metros antes del punto de vertido y otra 500 m después del vertido. En muestras de suelos, las muestras que superan el límite legal están localizadas en las instalaciones de la batería nº3 y a lo largo del oleoducto que conecta a esta con el río Maraón (Figura 12). En el resto de zonas se reportan solamente valores bajos, incluidas las correspondientes al oleoducto Norperuano.

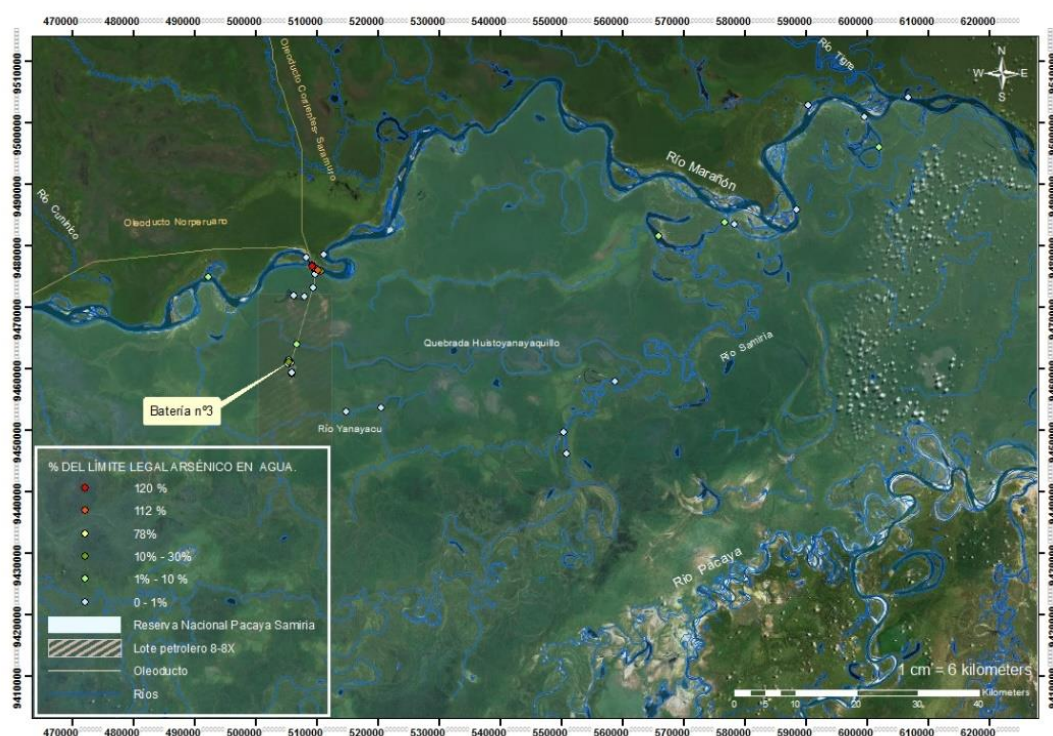


Figura 11- Muestras de arsénico en agua (N= 127) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. (Ministerio del Medio Ambiente, 2008). Categoría 4 ríos de selva.

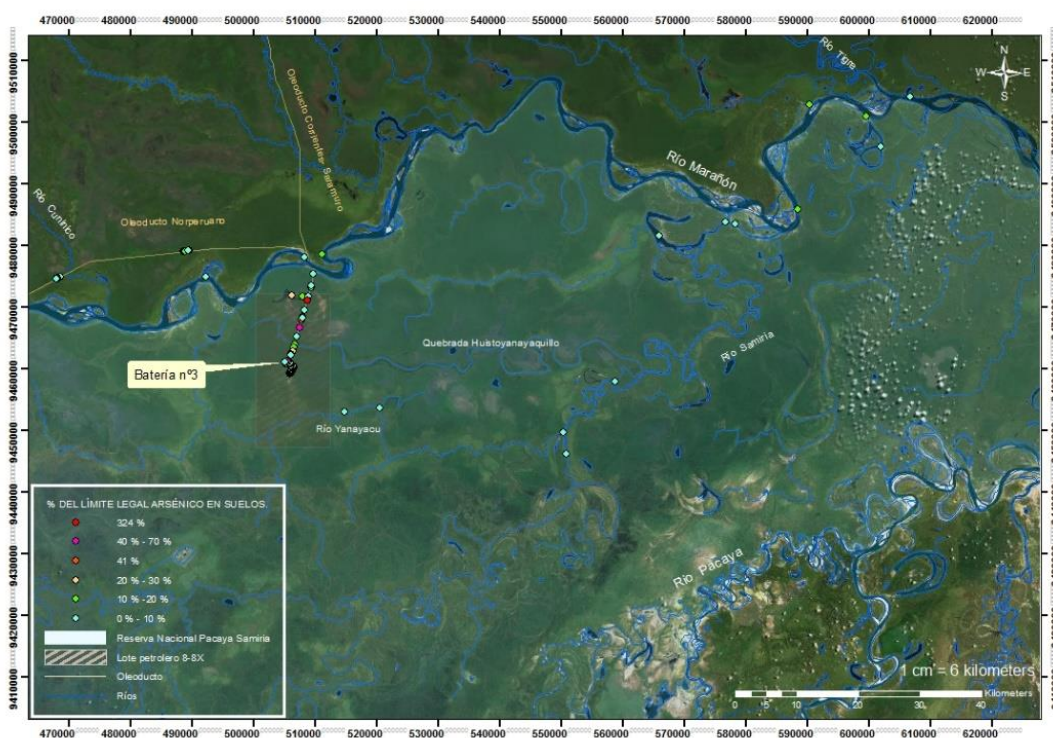


Figura 12- Arsénico en muestras de suelo (N= 115) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Ambiente, 2013)

4.3.3 Bario

De bario se recopiló 365 muestras en agua, de las que el 29% son valores LD. El límite legal vigente en aguas es de 1mg/l para ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008), y el 1.1% de las muestras es superior a este límite. Si se considera solo el periodo de la actual normativa, en 2008-2015 baja a 0%. Considerando el límite legal de la Categoría 1: Agua apta para potabilizar subiría al 3.3%. En cuanto a muestras de suelo, se incluyeron las concentraciones de 120 muestras en suelo, de las que <1% son valores LD y el 19.2% superan los límites legales, baja a 18.4% si solo se considera el periodo de vigencia de la normativa en 2013-2015.

En muestras de agua, el modelo estadístico (Anexo 6, Figura 23) explica el 57% de la varianza en las concentraciones de bario y el factor que mejor explica la diferencia entre grupos es el año de colecta son: 1- 2000, 2001 y 2002 (0.30 mg/l); 2 - muestras del resto de años (0.096 mg/l). El grupo 1 está influenciado por la estacionalidad: Vaciente (0.89 mg/l) y Creciente-Transición (0.156mg/l). El factor cuenca es significativo en años concretos, siendo las concentraciones en los ríos Huistoyanayaquillo y Samiria (0.190 mg/l) mayores a las del río Marañón (0.085 mg/l).

En muestras de suelo, el árbol del bario (Figura 3, Anexo 6) explica el 39% de la varianza y el principal factor es la distancia respecto al punto de vertido: <117 m (2500 mg/kg) y >117m (275,2mg/kg). De los años analizados (2012-2015), en el año 2014-2015 se observan concentraciones más elevadas (3295 mg/kg).

El mapa de distribución de las concentraciones de bario en muestras de agua (Figura 13) indica que los valores sobre el límite se hallan cerca de los antiguos puntos de vertido de aguas producidas, tanto en el Marañón como en la quebrada Huistoyanayaquillo, y también en la zona de las plataformas de extracción que forman parte de la batería n°3.

En muestras de suelo, todas las muestras con concentraciones de bario que superan el límite legal se localizan en el oleoducto del río Marañón y en las plataformas 60, 32 y 38 de la batería n°3 (Figura 14). En el río Samiria, en localización alejada a estos puntos, se reporta una muestra con concentraciones que superan el 60-90% del límite legal.

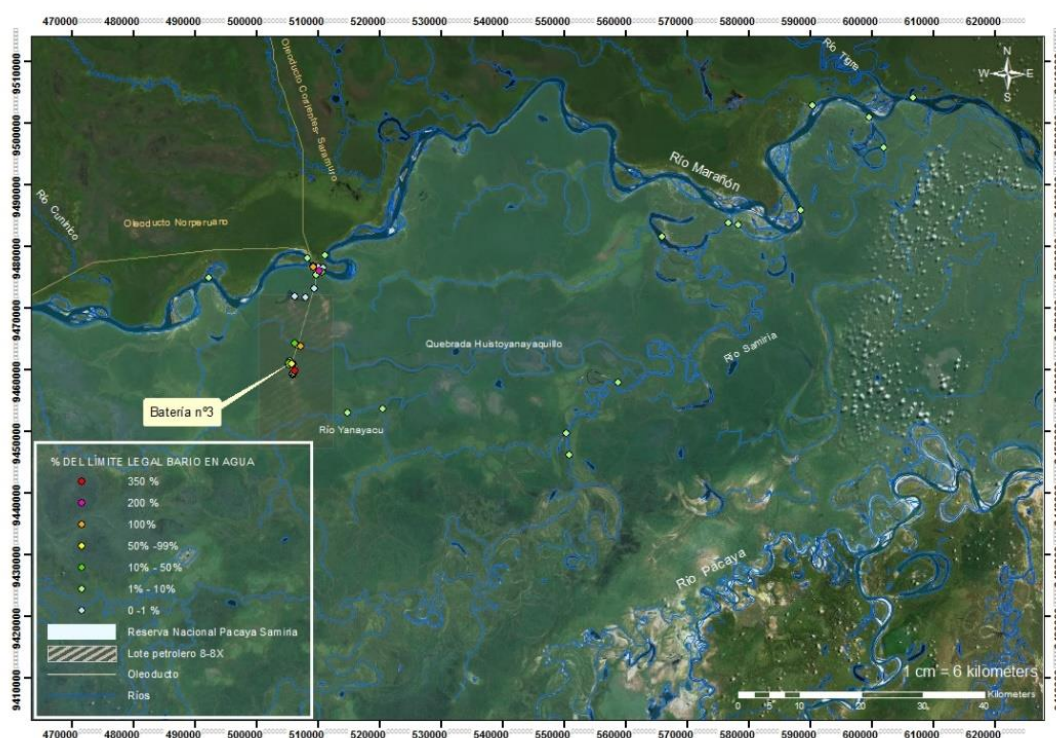


Figura 13- Muestras de bario en agua (N= 365) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4 ríos de selva (Ministerio del Medio Ambiente, 2008).

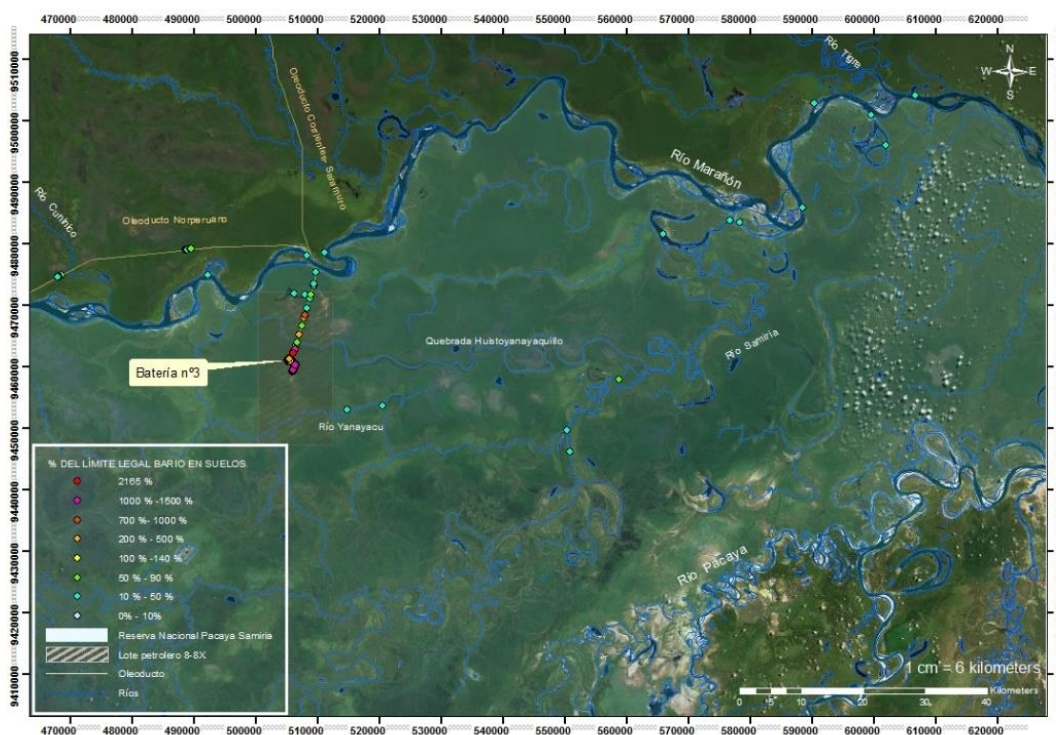


Figura 14- Bario en muestras de suelo (N= 120) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

4.3.4 Berilio

De berilio se recopilaron concentraciones de 31 muestras en agua, de las que el 87% son valores LD, y concentraciones de 39 muestras de suelos con <1% en valores LD.

No hay límite legal vigente ni en agua ni en suelos. Considerando la Categoría 1 de aguas potables, ninguna muestra supera el límite legal. En suelos solo se contempla en la norma canadiense y ninguna muestra supera el límite legal. Hay poca presencia de berilio en la RNPS.

No hay suficientes datos para realizar el estudio estadístico del berilio, tampoco se han creado mapas al no tener límites legales en la normativa nacional vigente.

4.3.5 Boro

Del boro se ha contado con concentraciones de 29 muestras en agua, de las que el 38% son valores LD, y concentraciones de 34 muestras de suelos con 85% en valores LD. No está regulado por la normativa de ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008) y comparado con otras normativas internacionales ninguna muestra presenta concentraciones que superen los límites legales.

No hay suficientes datos para realizar el estudio estadístico en aguas ni en suelos.

4.3.6 Cloruros

Se recopilaron concentraciones de 355 muestras de cloruros en agua, sin valores LD. Los cloruros no están regulados para aguas de ríos de selva. Considerando la normativa canadiense (Canadian Council of Ministers of the Environment 2001), el 5.4% de muestras tienen concentraciones que superan el límite legal.

El árbol en cloruros de muestras de agua (Anexo 6, Figura 5) explica el 58% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1- 1996-1997 (229 mg/l); 2- 1998-2008; 2010-2013 (13.22 mg/l). Dentro del periodo 1996-1997 considera significativo a la ubicación de la colecta de muestra antes (37.7 mg/l) y después (458.6 mg/l) de vertido.

No se dispone de valores de cloruros en suelo. Tampoco se representan mapas de distribución al no estar regulados en ríos de selva.

4.3.7 Conductividad

La conductividad es un parámetro físico que mide la resistencia al paso de la corriente de un medio y está muy relacionada con la cantidad de sales disueltas en agua, por tanto principalmente con los cloruros. La conductividad no se mide en suelos.

En agua se dispone de 107 muestras. No está regulada para aguas de ríos de selva. La normativa para aguas aptas para potabilización (Ministerio del Ambiente 2008) muestra un 6.5% de valores superiores al límite legal.

El árbol de regresión de la conductividad en muestras de agua (Anexo 6, Figura 4) explica el 47% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1- 1996-1997 (822.5 mg/l); 2- 1998, 1999, 2000; 2004, 2006, 2013 (175.8 mg/l). Dentro del grupo 1, las muestras colectadas después del punto de vertido presentan concentraciones mayores antes (1612 mg/l) respecto a las colectadas antes del punto de vertido (164 mg/l). La estacionalidad es significativa dentro del grupo 2 con concentraciones mayores en época de Creciente y Transición (194 mg/l) respecto a la Vaciante (131 mg/l).

4.3.8 Cadmio

De cadmio se recopilieron concentraciones de 207 muestras en agua, de las que el 69% son valores LD, y concentraciones de 120 muestras de suelo con el 54% en valores LD. El porcentaje elevado de valores LD indica niveles muy bajos de contaminación. No obstante, en el 6.8% de los valores LD, la metodología presenta una LD que supera el límite legal, por lo tanto no permite discriminar la legalidad de esas muestras. Si solo se considera el periodo de la normativa vigente (Ministerio del Ambiente 2008) las muestras sobre el límite legal bajan al 0.8% del total. Si consideramos la categoría agua apta para potabilización de la norma nacional, el 17.4% de las muestras tendrían concentraciones que superarían el límite legal.

En suelos hay N= 114 muestras, de las que el 45% son valores LD. El límite de 10mg/kg vigente lo supera el 5 % de las muestras, al igual que con la norma de suelos del Canadá. Considerando solo el periodo vigente de la normativa, durante 2013-2015 el porcentaje asciende a 5.2 % del total.

En muestras de agua, el árbol de regresión (Figura 6, Anexo 6) solo explica el 12.3% y no es suficiente para considerar representativo el estudio estadístico.

En muestras de suelo, el árbol de regresión del cadmio (Anexo 6, Figura 26) explica el 24% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1- 1997,2013 (2.98 mg/kg) y 2- 2012, 2014, 2015 (1.08 mg/kg). El factor distancia respecto al punto de vertido es significativo en el grupo 1: <261 m (4.87 mg/kg) y >261 m (2.28 mg/kg).

Los mapas de distribución del cadmio (Figura 15) muestran que las muestras de agua con concentraciones de cadmio por encima del límite legal están ubicadas en las instalaciones de la batería 3, en el tramo del río Maraón que han recibido el vertido de aguas producidas y en la quebrada Huistoyanayaquillo. Hay muestras con concentraciones que superan el límite y están aguas arriba del punto de vertido, tanto en el Maraón como en Huistoyanayaquillo. En muestras de suelos, las muestras con mayores concentraciones de cadmio se localizan a lo largo del oleoducto entre la batería nº3 y río Maraón, y en los alrededores de la batería nº3 (Figura 16).

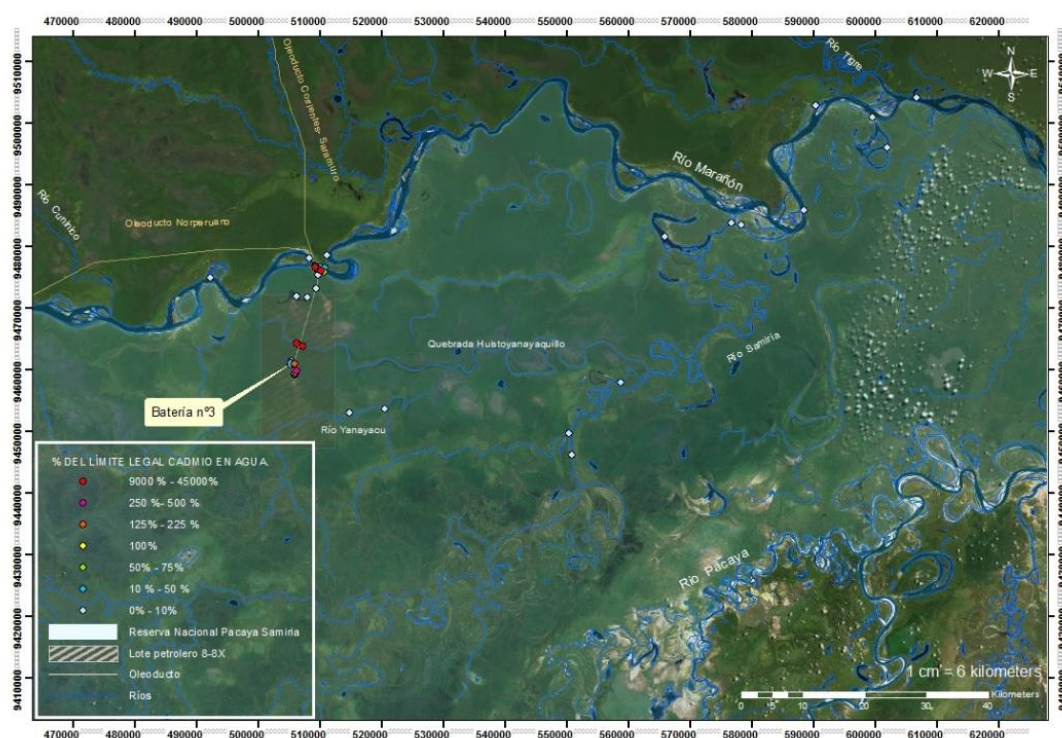


Figura 15- Muestras de cadmio en agua (N=207) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4 ríos de selva (Ministerio del Medio Ambiente, 2008).

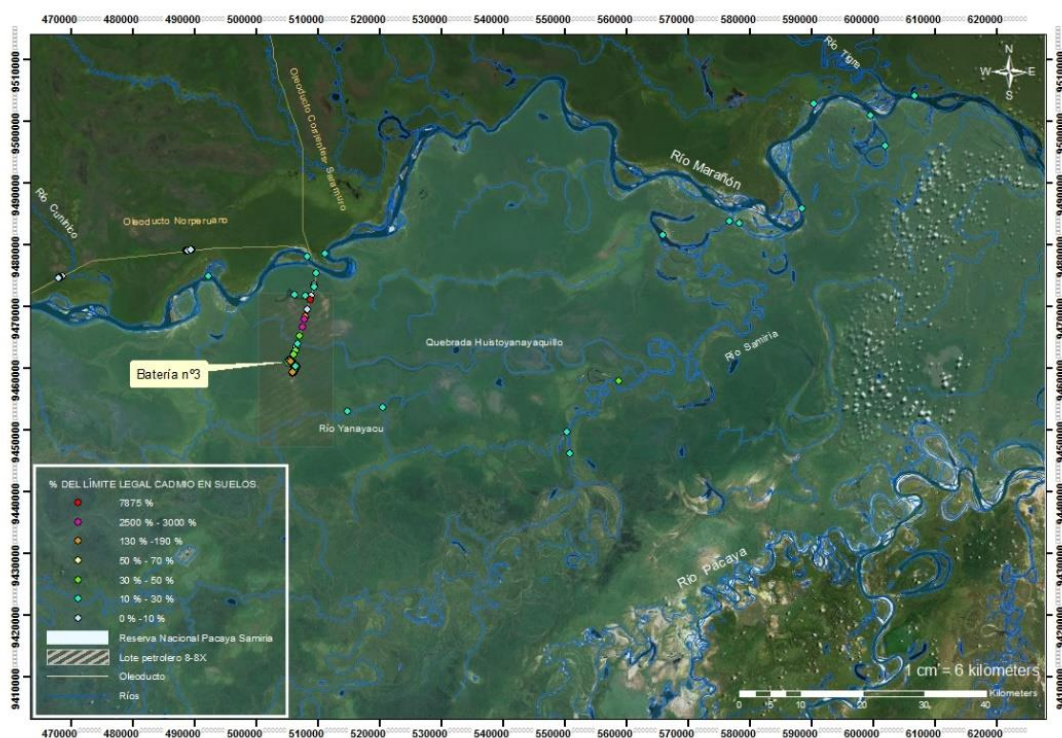


Figura 16- Cadmio en muestras de suelo (N= 120) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

4.3.9 Cobalto

Se incluyó en la base de datos 29 valores de cobalto en muestras de agua, de las que el 62% son valores LD; y concentraciones de 39 muestras de suelos con <1% en valores LD. No hay límite legal para ríos de selva ni suelos (Ministerio del Ambiente 2008). El único punto legal de referencia es de muestras de suelo según la Canadian Soil Quality Guidelines; en tal caso, el 5.1% de muestras presentarían concentraciones superiores al límite legal.

El árbol de regresión del cobalto en muestras de suelo (Anexo 6, Figura 28) explica el 63% de la varianza y distingue como factor determinante a la cuenca: ríos Maraño-Huistoyanayaquillo (8.9 mg/kg) y Samiria (2.7 mg/kg).

4.3.10 Cromo total

Se analizó las concentraciones cromo total de 148 muestras en agua, de las que el 61% son valores LD; y concentraciones de 40 muestras de suelos sin valores LD.

La legislación nacional vigente no limita la presencia de cromo total en agua. Si consideramos la normativa canadiense o Categoría 1 de agua apta para potabilización de la normativa nacional, el límite sería 0.05 mg/l y ninguna muestra supera el límite legal. En muestras de suelo el cromo total no se contempla en la normativa vigente, y solo el 5% de las muestras superaría el valor límite de la norma canadiense.

En aguas el árbol del cromo total (Anexo 6, Figura 8) explica el 58% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1- 1996; 2007 (0.0137 mg/l); 2- 2006, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013 (0.0027mg/l). El análisis también determina la estacionalidad como factor influyente en la variación de concentraciones de cromo total: creciente (0.0044 mg/l); transición y vaciante (0.003 mg/l). El factor ubicación de la colecta de la muestra aparece solo para explicar los cambios de concentraciones en el año 2011: antes del punto de vertido (0.0029 mg/l) y después del punto de vertido (0.004 mg/l).

En muestras de suelo, el modelo estadístico del cromo total (Anexo 6, Figura 29) explica el 19% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra respecto a la probable fuente petrogénica: <133 m (83.1 mg/kg) y >133 m (12.69 mg/kg).

Al no tener límites legales no se han creado los mapas de distribución de cromo en la zona de estudio.

4.3.11 Cromo hexavalente

Se compilieron las concentraciones de cromo hexavalente de 57 muestras en agua, de las que el 30% son valores LD; y concentraciones de 69 muestras de suelos con 94% en valores LD.

El límite legal vigente para muestras de agua de selva (Ministerio del Ambiente 2008) es de 0.05 mg/l, el 10.5% de las muestras tiene concentraciones que superan este límite. Si se compara con

la normativa canadiense este porcentaje asciende al 66.7% de muestras. No hay datos en agua para considerar solo el periodo de vigencia de la normativa. En cuanto a muestras de suelos, el límite legal vigente es de 0.4 mg/kg, el 5.8% de las muestras tiene concentraciones que superan el límite vigente. Considerando solo el periodo vigente de la norma 2013-2015 se mantiene el mismo porcentaje.

En muestras de agua, el árbol de regresión del cromo hexavalente (Anexo 6, Figura 9) explica el 29% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la estacionalidad: 1- creciente (0.044 mg/l); 2- transición-vacante (0.0099 mg/l). Dentro del grupo 2, la ubicación respecto al punto de vertido es un factor significativo: después (0.013 mg/l) y antes (0.006) del punto de vertido.

No se ha realizado el árbol de regresión del cromo hexavalente en muestras suelos debido a que explica <15% de la varianza.

En la distribución espacial de muestras de agua (Figura 17), las concentraciones que superan el límite legal se localizan en la quebrada Huistoyanayaquillo, aguas abajo del punto de vertido de aguas producidas y en el río Maraño. En la distribución espacial de muestras de suelo (Figura 18), las concentraciones que superan el límite legal se ubican solamente en la zona donde tuvo lugar el derrame reportado en 2014 en el oleoducto Norperuano, al norte del río Maraño y a la altura del poblado San Pedro.

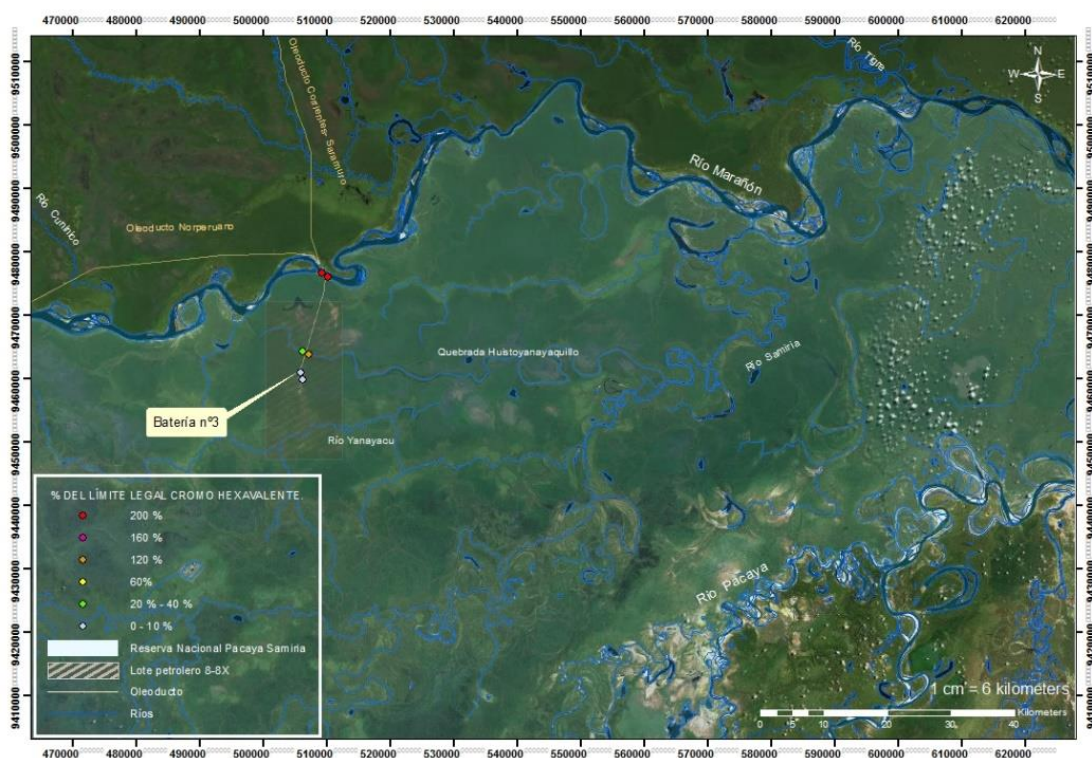


Figura 17- Muestras de cromo VI en agua (N= 57) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM, Categoría 4 ríos de selva. (Ministerio del Ambiente, 2008).

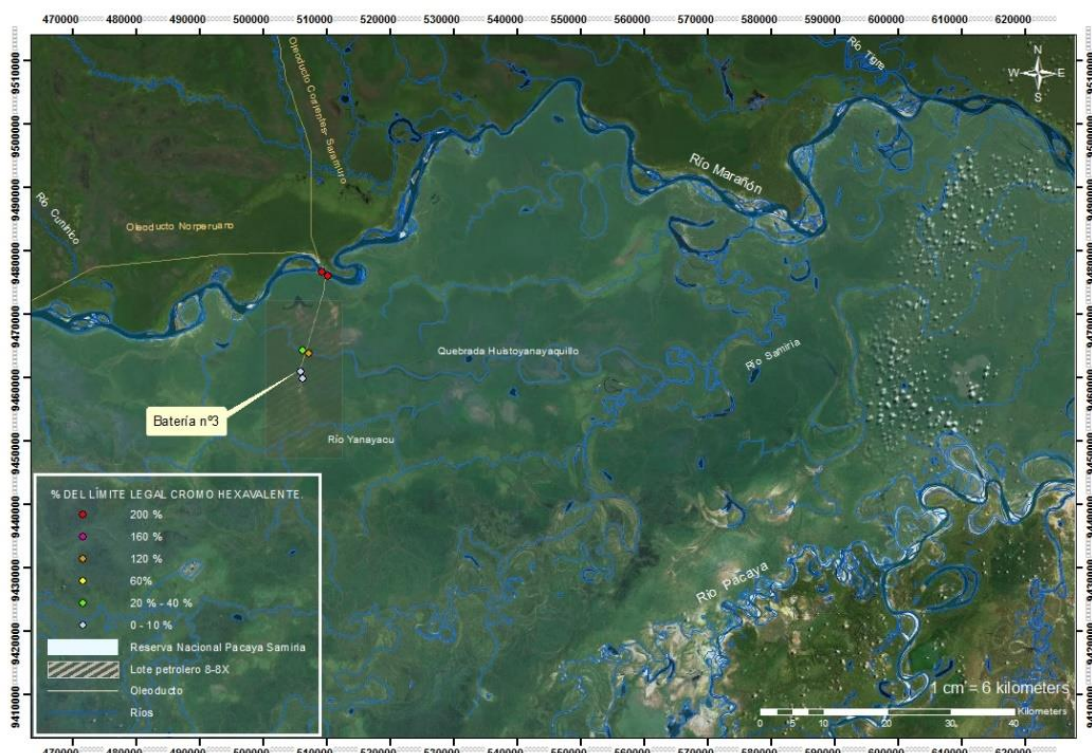


Figura 18- Cromo (VI) en muestras de suelo (N=69) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

4.3.12 Estroncio

Se recopilieron las concentraciones de estroncio de 29 muestras en agua y de 34 muestras de suelos. No se observan valores LD. El estroncio no está regulado por la normativa de la RNPS ni en ninguna otra de este trabajo.

No hay datos para su estudio estadístico en aguas. El árbol de muestras de suelos (Anexo 6, Figura 46) explica el 39% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra: <298 m (195.9 mg/kg) y >298 m (31.7 mg/kg).

4.3.13 Fenoles

Para los fenoles se recopilieron las concentraciones de 142 muestras en agua, de las que el 75% son valores LD. Su límite legal en ríos de selva es de 0.001 mg/l (Ministerio del Ambiente 2008) y el 18.3% de las muestras tiene concentraciones que superan el límite vigente. El 15.5% de las muestras de agua tiene concentraciones que superan el límite vigente para la Categoría de agua apta para potabilización de la normativa nacional. No hay datos de fenoles en suelos.

En muestras de agua, el modelo estadístico de fenoles (Anexo 6, Figura 10) explica el 44% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1- 1997, 1998, 1999 (0.011 mg/l); 2- 1996, 2000, 2006, 2008, 2010, 2011, 2012 (0.0007 mg/l).

Dentro del grupo 1, el factor ubicación de colecta de muestra respecto al punto de vertido es factor determinante: después (0.0146 mg/l) y antes (0.0075 mg/l) del punto de vertido.

El mapa de distribución de fenoles en agua (Figura 20) muestra que los valores con concentraciones que superan el límite legal se ubican 500 m antes y 500 m después del punto de vertido .en el Maraón y en la quebrada Huistoyanayaquillo.

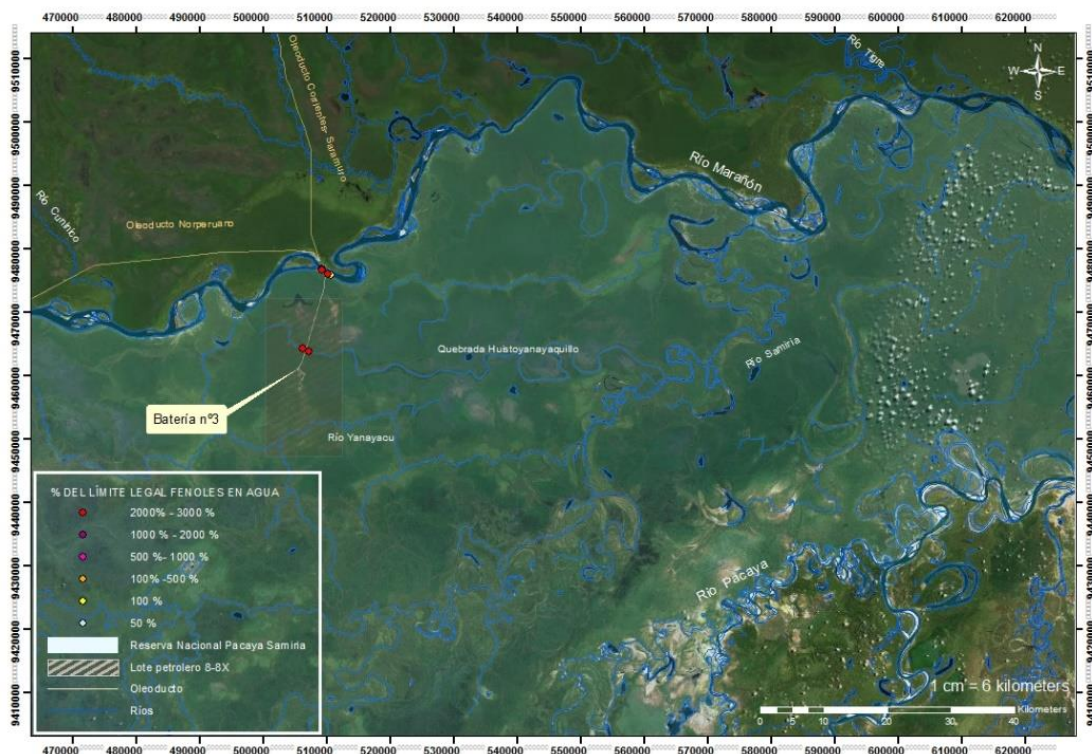


Figura 19- Muestras de fenoles en agua (N= 142) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4 ríos de selva. (Ministerio del Ambiente, 2008).

4.3.14 Litio

Para litio se recopilieron las concentraciones de 29 muestras en agua, de las que el 79% son valores LD; y concentraciones de 34 muestras de suelos con 9% en valores LD. No está sujeto a límites legales ni en agua ni en suelo.

En aguas no son suficientes los datos para su estudio estadístico. En muestras de suelo, el árbol de regresión (Anexo 6, Figura 34) explica el 30% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra: >1508 m (10.7 mg/kg) y <1508 m (6.1 mg/kg).

4.3.15 Mercurio

Se recopilieron concentraciones de mercurio de 205 muestras en agua, de las que el 95% son valores LD; y concentraciones de 120 muestras de suelos con 66% en valores LD.

El límite legal del mercurio en agua es de 0.001 mg/l (Ministerio del Ambiente 2008) y un 60% de las muestras supera este límite. No obstante, el 57% de las muestras tiene concentraciones LD analizadas con metodologías con LD superiores al límite legal; consecuentemente, este porcentaje podría aumentar considerablemente. Comparando con la normativa canadiense, el 95.1% de las muestras superarían el límite legal. Si solo se considera 2008-2015 con la normativa vigente (Ministerio de Ambiente 2008) resulta un 45% del total de muestras están sobre el límite legal. En comparación con la normativa europea y la Categoría 1 de la norma nacional no habría muestras con concentraciones que superen el límite legal. El límite legal vigente de mercurio en suelos es de 6.6 mg/kg y ninguna muestra tiene concentraciones que superen este límite.

En muestras de agua, el árbol de regresión del mercurio (Anexo 6, Figura 12) explica el 64% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1- 2006-2008, 2010, 2011 (0.00007 mg/l), 2- 1996-2000; 2012, 2013 (0.00003 mg/l). Dentro de los años 2006 y 2010, la estacionalidad es un factor influyente: creciente-vacante (0.0067 mg/l) y transición (0.000011 mg/l). Algo similar sucede en el año 2012: creciente + vacante (0.00043 mg/l) y transición (0.00029 mg/l).

En muestras de suelo, el árbol del mercurio (Anexo 6, Figura 32) explica el 22% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 2014-2015 (0.46 mg/kg) *versus* 1997, 2012 y 2013 (0.11 mg/kg). En el período 2014-2015 la ubicación de colecta de muestra es significativo, siendo las muestras con mayor concentración las que están a >90 m del punto de vertido (0.73 mg/kg).

Los mapas de distribución de mercurio (Figura 20) muestran que en agua muchos valores sobre el límite legal que son casi en su totalidad valores estimados, y en suelos no hay valores por encima del límite legal vigente (Figura 21).

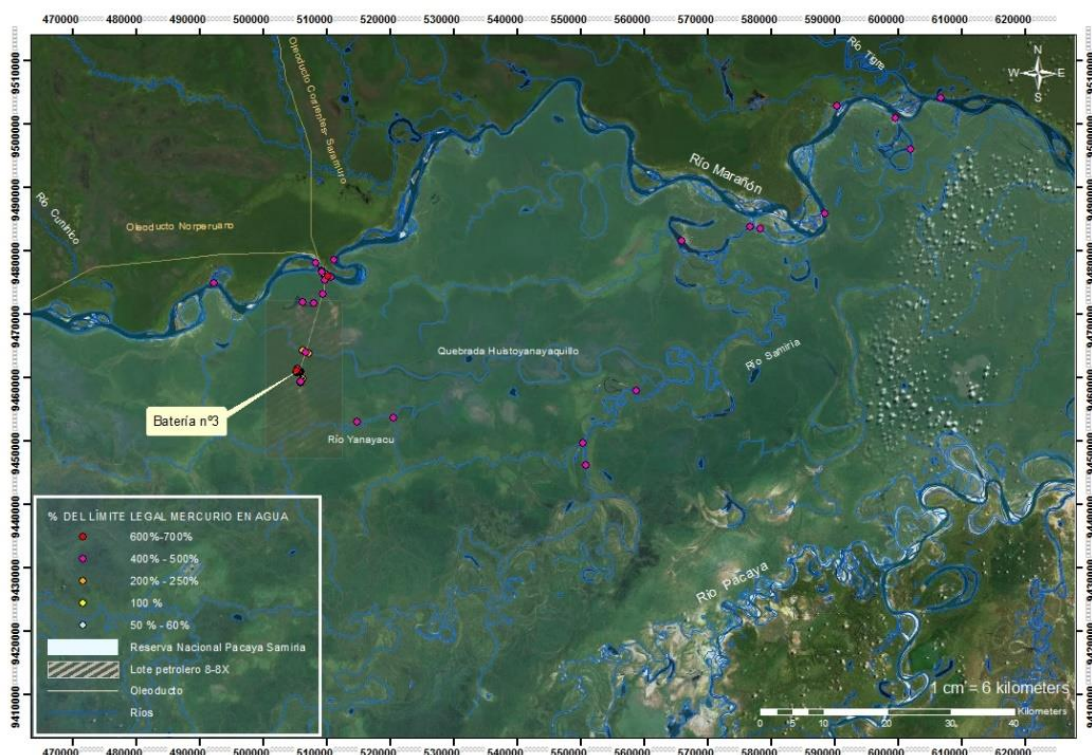


Figura 20- Muestras de mercurio en agua (N= 205) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4 ríos de selva. (Ministerio del Ambiente, 2008).

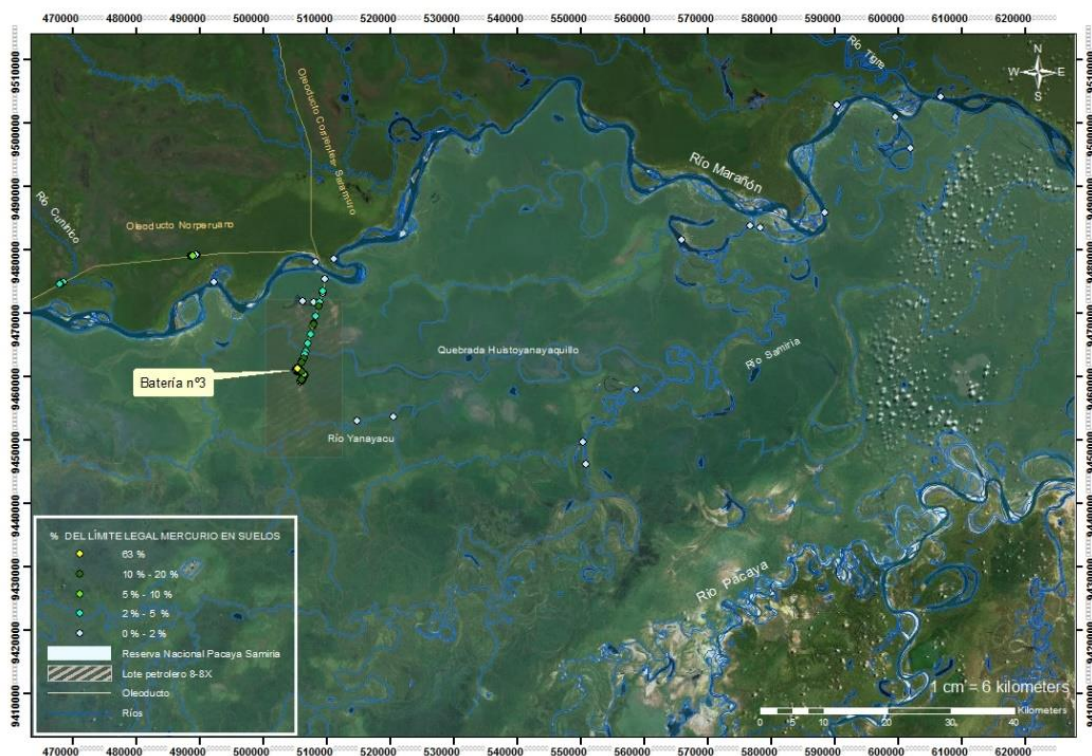


Figura 21- Mercurio en muestras de suelo (N=120) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

4.3.16 Molibdeno

De molibdeno se recopilaron concentraciones de 39 muestras de suelos con 43% en valores LD. En agua no se dispone de datos. No está regulado en ríos de selva. El 6.6% de las muestras tiene concentraciones que superan el límite de la norma Canadian Soil Quality Guidelines.

El árbol en suelo de molibdeno (Anexo 6, Figura 37) explica el 16% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra respecto a la probable fuente petrogénica: <133 m (0.52 mg/kg) y >133 m (0.26 mg/kg).

4.3.17 Níquel

Se recopilaron las concentraciones de 63 muestras de níquel en agua, de las que el 60% son valores LD, y concentraciones de 39 muestras de suelos con <1% en valores LD.

El límite legal en ríos de selva es de 0.025 mg/l según el Decreto Supremo Nº 002-2008–MINAM. Categoría 4 ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008). El 6.3% de las muestras de agua tiene concentraciones que superan el límite vigente. Similar porcentaje resulta dentro del periodo vigente de la normativa de aguas. Para muestras de suelo, no existe ninguna regulación nacional. El único referente legal que tenemos es la normativa canadiense de suelos y según ésta ningún valor superaría el límite legal.

En muestras de agua, el árbol del níquel (Anexo 6, Figura 13) explica el 22% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1- 2006 y 2012 (0.012 mg/l), y 2- 2011 y 2013 (0.0015mg/l). Dentro del grupo 1 el factor ubicación de la colecta es un factor influyente: antes (0.014 mg/l) y después (0.0096 mg/l) del punto de vertido.

El árbol en suelos explica (Anexo 6, Figura 39) el 59% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra respecto a la probable fuente petrogénica: >1508m (12.6 mg/kg) y <1508 m (4.7 mg/ kg)

El mapa de distribución de níquel en muestras de agua (Figura 22) muestra que los valores elevados se ubican solo en el río Marañón, 500 m antes y después del punto de vertido de la batería.

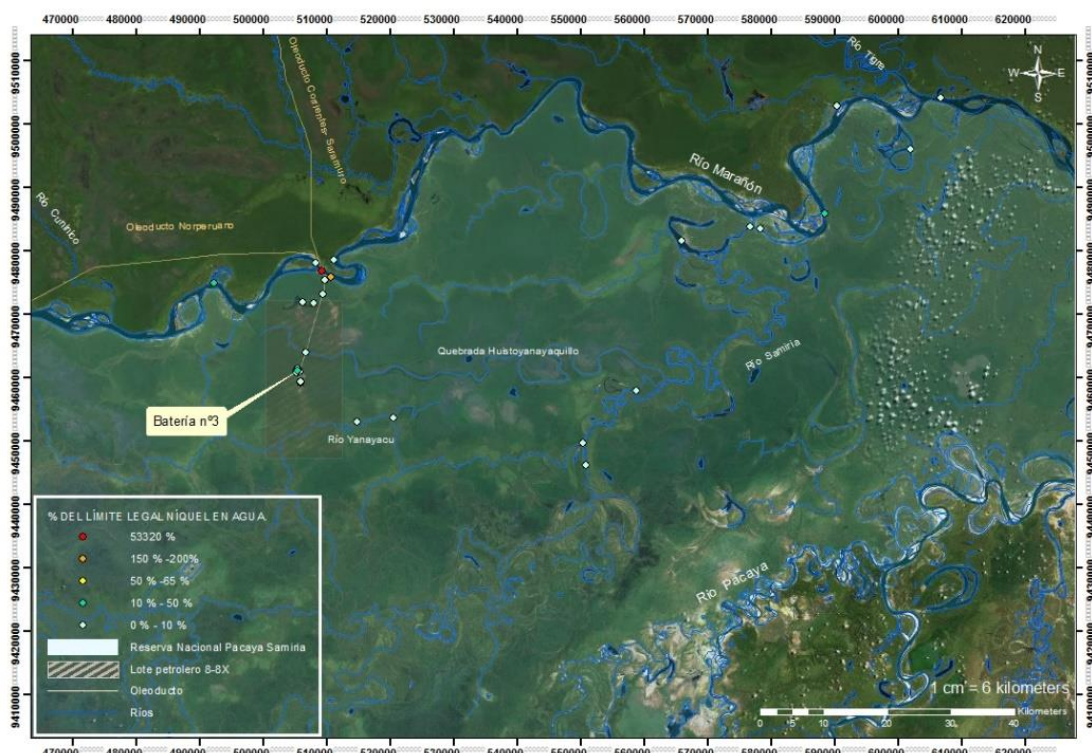


Figura 22- Muestras de níquel en agua (N=63) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4 ríos de selva. (Ministerio del Ambiente, 2008)

4.3.18 Plomo

Se recopilaban las concentraciones de 374 muestras de plomo en agua, de las que el 64% son valores LD; y concentraciones de 120 muestras de suelos con 54% en valores LD.

Si se consideran solo los LD, el 22.5% de las muestras de agua tiene concentraciones que superan el límite vigente. Considerando solo el periodo de la norma vigente en aguas llega al 30.3% del total de muestras, entre 2008-2015. Los porcentajes serían también de 22.5% si la referencia hubiese sido la norma canadiense Canadian Council of Ministers of the Environment 2001), y con la categoría de agua apta para potabilización (Ministerio del Ambiente 2008) el 11.8% de las muestras tiene concentraciones que superan el límite vigente. El 5% de las 120 muestras de suelo tiene concentraciones que superan el límite vigente de 10 mg/kg (Ministerio del Ambiente 2013). Considerando solo el periodo de la norma vigente en suelos, 2013-2015, queda en 13.2%.

En muestras de agua, el árbol del plomo (Anexo 6, Figura 16) explica en un 22% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es el año: 1 - 1996, 1997, 1998, 2001, 2002, 2013 (0.00986 mg/l); 2- 1999, 2003-2008, 2010-2012 (0.0029 mg/l). La estacionalidad aparece como factor diferencial solo en los siguientes periodos anteriores al año 2008: a) 1999-2003: transición (0.0056 mg/l); creciente-vacante (0.00225 mg/l); b) 1996, 1997, 1998, 2001, 2002: creciente (0.0143 mg/l); transición-vacante (0.0072); y c) 2000: transición (0.0261 mg/l); creciente + vacante (0.0105 mg/l).

En muestras de suelo, el árbol de plomo (Anexo 6, Figura 41) explica el 22% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra respecto a la probable fuente petrogénica: <154 m (116.8 mg/kg) y >154 m (35.77 mg/kg).

Los mapas de distribución de plomo en la zona de estudio muestran que la contaminación por plomo es la más extendida, aguas abajo de los puntos de vertido (Figura 23). Es importante destacar que existen muestras de agua que superan el límite legal >10000%. En muestras de suelos con concentraciones sobre el límite legal se localizan en la zona próxima a la batería nº 3 y en el oleoducto que conecta la batería con el río Marañón (Figura 24).

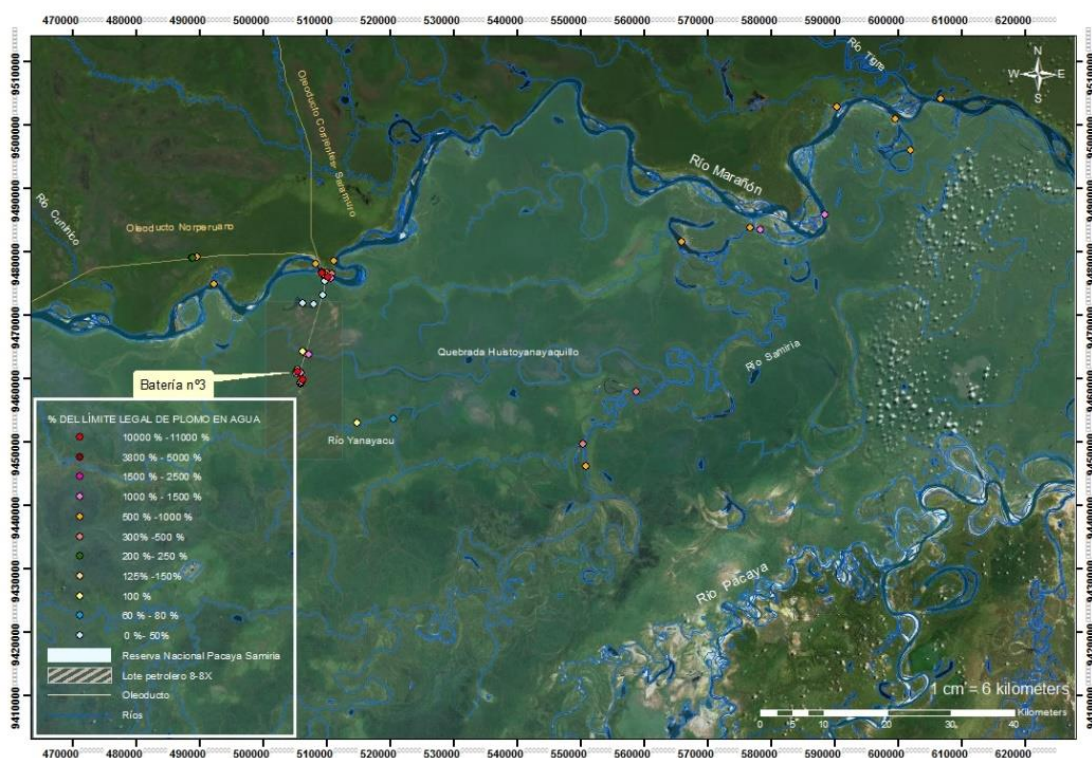


Figura 23- Muestras de plomo en agua (N= 374) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM. Categoría 4 ríos de selva. (Ministerio del Ambiente, 2008)

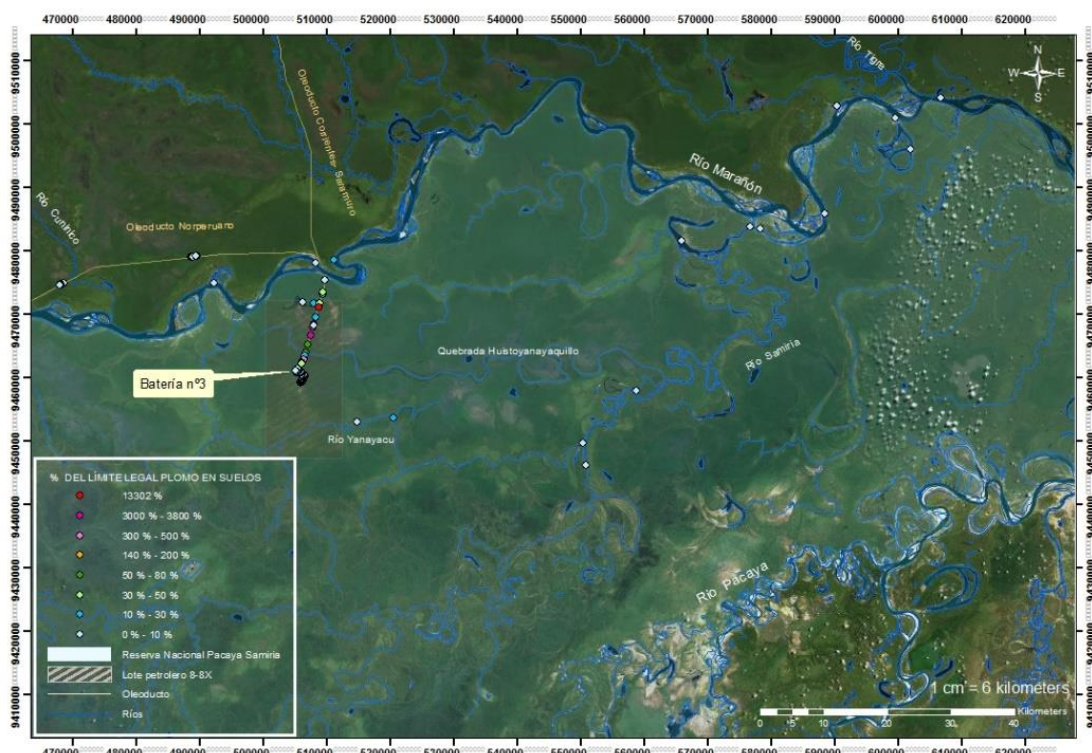


Figura 24- Plomo en muestras de suelo (N=120) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013)

4.3.19 Vanadio

Se recopilieron las concentraciones de 31 muestras de vanadio en agua, de las que el 29% son valores LD; y concentraciones de 39 muestras de suelos, sin valores LD.

No está regulado en la normativa nacional de ríos de selva, solo lo está en la categoría de agua apta para potabilización. Considerando esta última ninguna muestra tiene concentraciones que superan el límite legal. En la normativa nacional de suelos tampoco se encuentra el vanadio. Considerando la normativa canadiense ningún valor supera su límite legal.

No hay suficientes datos para el estudio estadístico en agua. El árbol de regresión del vanadio en suelos (Anexo 6, Figura 50) explica el 32% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra respecto a la probable fuente petrogénica: >298 m (42.05 mg/kg) y <298 m (22.04 mg/kg).

4.3.20 Titanio

De titanio solo se ha dispuesto de 34 muestras en suelos y ninguna muestra presenta valores LD. No hay datos en agua. No está regulado por ninguna normativa considerada en este trabajo y no se disponen de suficientes datos para su análisis estadístico en aguas.

En muestras de suelo, el modelo estadístico (Anexo 6, Figura 47) explica el 53% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra respecto a la probable fuente petrogénica: <329 m (50.6 mg/kg) y >329 m (211.6 mg/kg).

4.3.21 TPHs

Se recopilieron concentraciones de 167 muestras de TPHs totales en agua, de las que el 90% son valores LD; y concentraciones de 22 muestras de suelos con 13% en valores LD.

No están reguladas por la normativa aplicable, pero su presencia en la RNPS queda patente al comparar los valores ambientales con la Categoría 1 de agua apta para potabilización (Ministerio del Ambiente 2008). El 25.1 % de las muestras de agua tiene concentraciones que superan el límite vigente. No existe límite legal en muestras de suelos ni datos suficientes para el estudio estadístico.

En muestras de agua, el árbol de los TPHs (Anexo 6, Figura 19) explica el 40% de la varianza. El factor que explica las diferentes concentraciones entre grupos es por año de colecta de muestra: 1- 2006, 2008 (0.074 mg/l); 2- 2007, 2013 (0.0256 mg/l); y 3- 2010, 2011 (0.02 mg/l).

4.3.22 TPHs C6-C10

Se recopilieron las concentraciones en 100 muestras de TPHs de 6 a 10 átomos de carbono en suelos, con 84% de valores LD. No hay disponibles análisis de TPHs C6-C10 en aguas.

La normativa nacional aplicable a parques (Ministerio del Ambiente 2013) establece un límite de 200 mg/kg. El 5 % de las muestras tiene concentraciones que superan el límite vigente. Todas las muestras son del 2013 o posteriores, así que durante el periodo de vigencia se dan el mismo porcentaje.

El modelo estadístico (Anexo 6, Figura 52) explica <15% de la varianza y no se ha considerado suficientemente conclusivo.

Según el mapa de distribución de muestras de agua para TPHs C6-C10 (Figura 25) las muestras con concentraciones que superan el límite legal se localizan exclusivamente cerca del oleoducto Norperuano, a la altura del río Cuninico. Todas las muestras de este compuesto se han analizado a raíz de la ocurrencia de un derrame del oleoducto, de ahí las elevadas concentraciones que presenta.

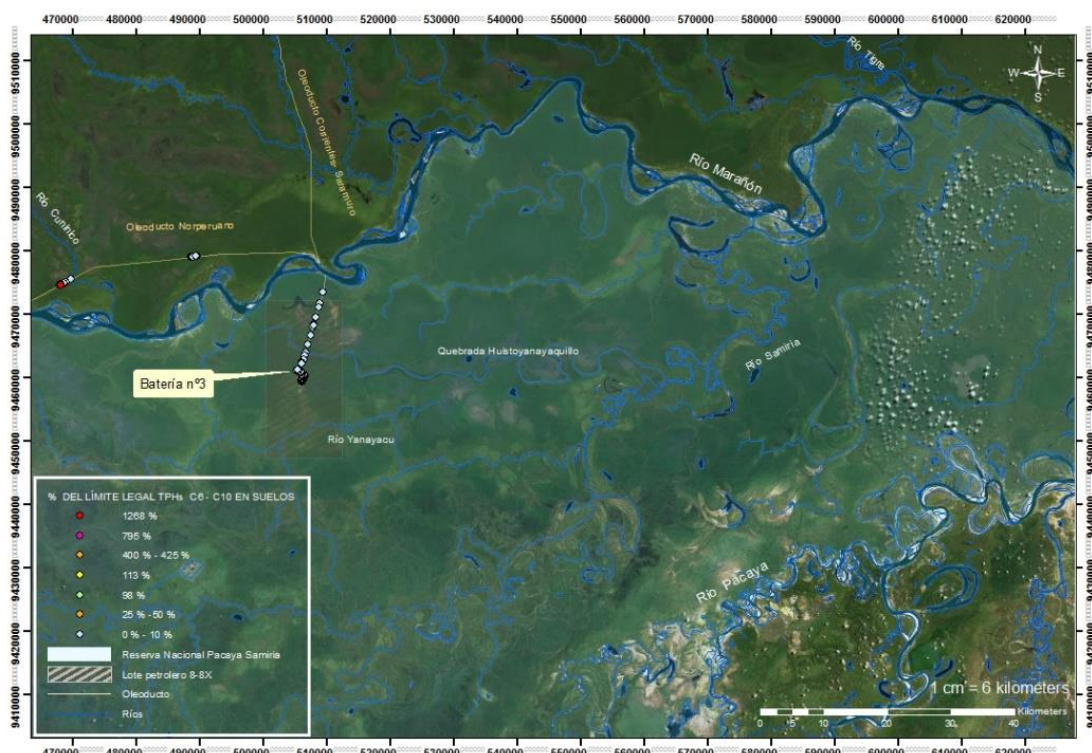


Figura 25- TPHs (C₆-C₁₀) en muestras de suelo (N= 100) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

4.3.23 TPHs C10-C28

Se recopilieron concentraciones de 100 muestras de TPHs de 10-28 átomos de carbono en suelos con 7% de valores LD. No disponemos de análisis de TPHs C10-C28 en aguas.

La normativa nacional aplicable a parques (Ministerio del Ambiente 2013) establece un límite de 1200 mg/kg. El 51 % de las muestras de suelos tiene concentraciones que superan el límite vigente. Durante el periodo de vigencia se dan el mismo porcentaje.

El modelo estadístico de TPHs C10-C28 en muestras de suelos (Anexo 6; Figura 53) explica el 24% de la varianza. El factor que mejor explica las diferentes concentraciones entre grupos es la ubicación de la colecta de muestra respecto a la probable fuente petrogénica: <175 m (7252 mg/kg) y >175 m (2033 mg/kg).

Según el mapa de distribución de muestras de agua para TPHs C6-C10 (Figura 26) las muestras con concentraciones que superan el límite legal se localizan entre la batería nº 3, el oleoducto que conecta esta con el río Marañón, la zona del oleoducto Norperuano a la altura del poblado San Pedro y en la zona del cruce entre el oleoducto y el río Cuninico.

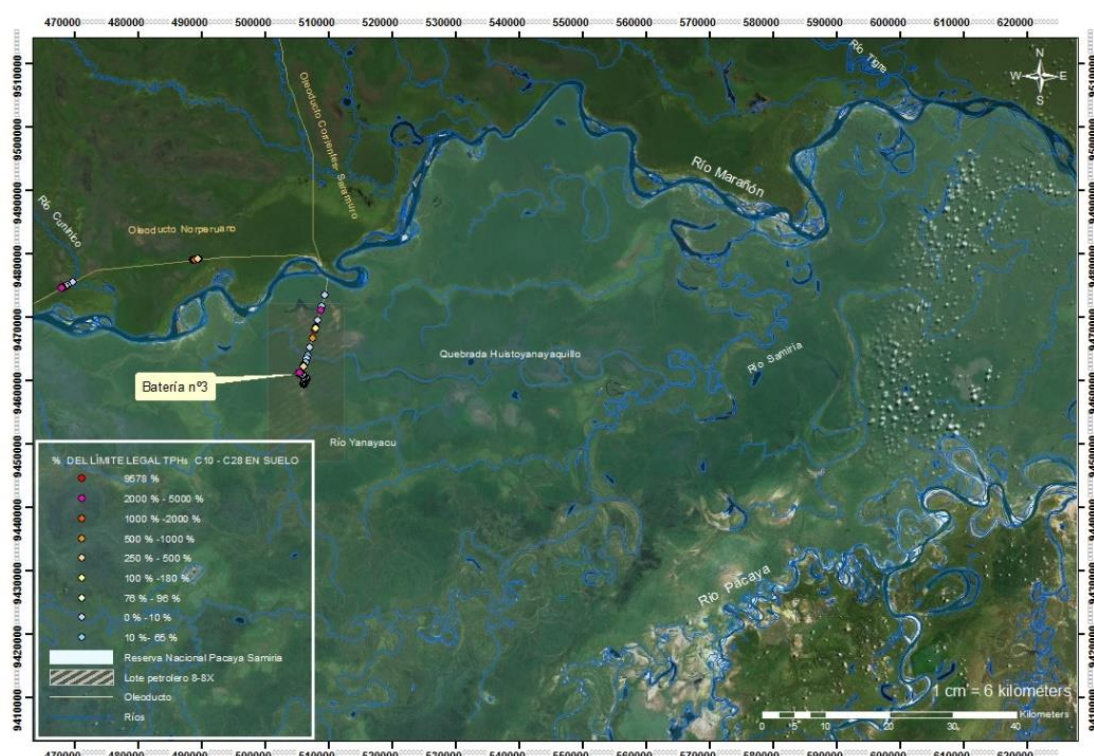


Figura 26- TPHs (C₁₀-C₂₈) en muestras de suelo (N= 100) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

4.3.24 TPHs C28-C40

Se recopilieron concentraciones de 100 muestras de TPHs de 28-40 átomos de carbono en suelos con 3% en valores LD. No disponemos de análisis de TPHs C28-C40 en aguas.

La normativa nacional aplicable a parques (Ministerio del Ambiente 2013) establece un límite de 3000 mg/kg. El 28% de las muestras tiene concentraciones que superan el límite vigente. Durante el periodo de vigencia se dan el mismo porcentaje.

El modelo estadístico (Anexo 6, Figura 54) explica <15% de la varianza y no se ha considerado suficientemente conclusivo.

En el mapa de distribución de TPHs C28-C40 (Figura 27) se observa que las muestras de suelos cuyas concentraciones superan el límite legal se ubican en la batería n° 3, en el oleoducto que conecta esta y el río Marañón, en la zona del oleoducto Norperuano a la altura del poblado San Pedro y en la zona de cruce oleoducto Norperuano-río Cuninico.

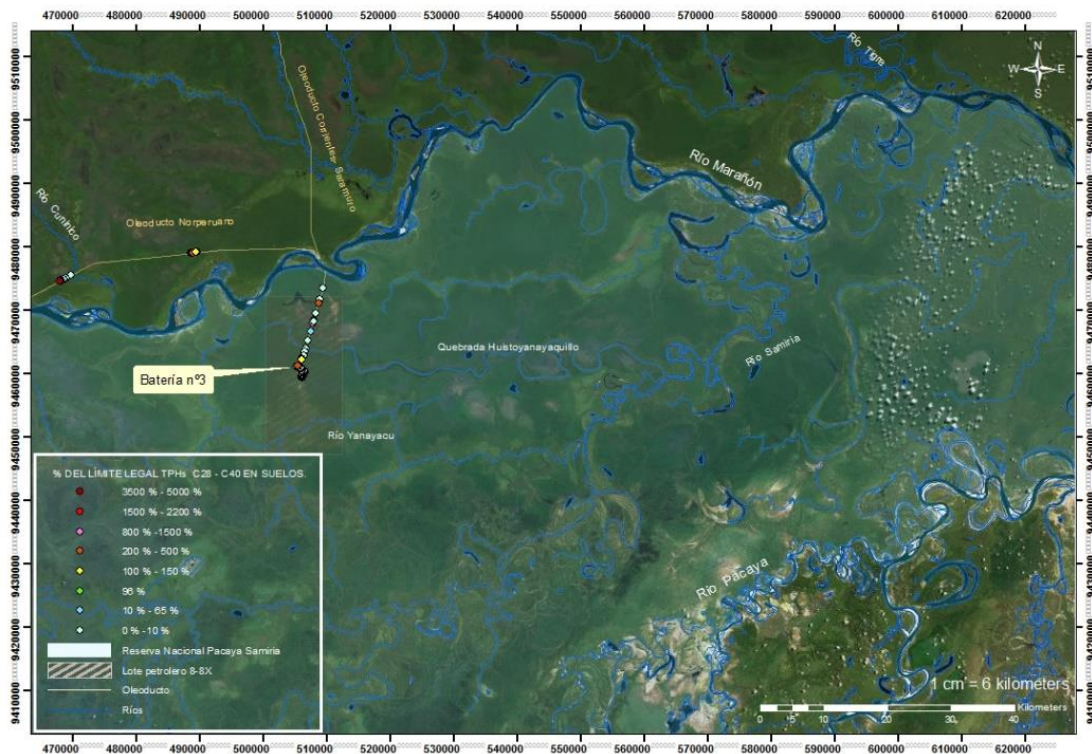


Figura 27- TPHs (C₂₈-C₄₀) en muestras de suelo (N= 100) en la zona de estudio. La graduación por colores muestra el resultado del análisis en forma de porcentaje sobre el límite legal, según el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques. (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

4.4 ANÁLISIS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

4.4.1 Estudio de la variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

La superficie inicial deforestada entorno a la batería Yanayacu y de los oleoductos incluidos en el área de estudio es de 117.3 ha, de las cuales 57.2 ha (48.8%) se encuentran en el interior de la RNPS (Figura 28). Esta deforestación se ha calculado mediante la selección de píxeles de la imagen de 1985 con un valor de NDVI inferior a 0.7

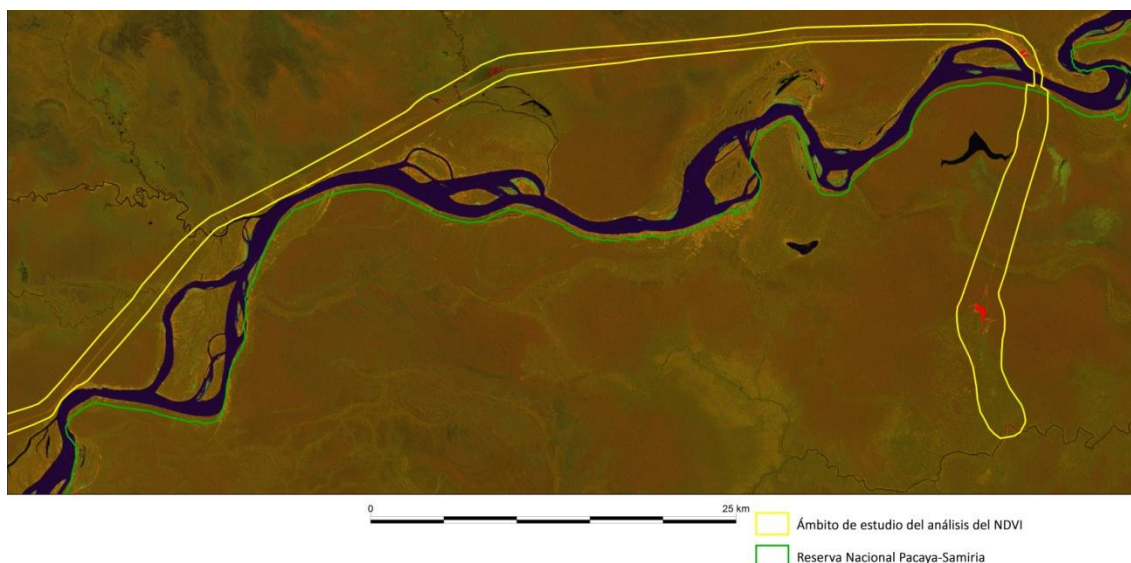


Figura 28. Selección de píxeles con un valor de NDVI inferior a 0.7 en la imagen del 6 de agosto de 1985.

Las áreas que han sufrido un incremento negativo de la producción primaria de la vegetación se han calculado en base a la diferencia del NDVI ponderado de cada imagen analizada (ver el apartado 3.1.1). Para ello se ha realizado una selección de los valores de la imagen por debajo de un umbral determinado para cada caso comprendido entre los valores -0.05 y -0.08 (Tabla 9).

Las áreas seleccionadas corresponden a aquellas zonas en las que, respecto al comportamiento general del conjunto de la vegetación, la producción primaria medida en términos de NDVI ha sufrido un incremento negativo desde la anterior imagen de satélite.

La Tabla 10 y la Figura 29 muestran la superficie de terreno en las que se ha identificado un incremento negativo del NDVI ponderado respecto al resto de la imagen.

	Umbrales de selección	
	Zonas en las que el NDVI presenta un incremento negativo	Zonas en las que el NDVI presenta un incremento positivo
Entre 06/08/85 y 09/08/86	-0.07	0.07
Entre 09/08/86 y 03/01/88	-0.06	0.07
Entre 03/01/88 y 29/07/88	-0.055	0.07
Entre 29/07/88 y 14/06/89	-0.06	0.07
Entre 14/06/89 y 06/06/92	-0.06	0.07
Entre 06/06/92 y 14/07/94	-0.065	0.07
Entre 14/07/94 y 19/09/95	-0.065	0.07
Entre 19/09/95 y 03/07/96	-0.07	0.07
Entre 03/07/96 y 22/05/98	-0.05	0.06
Entre 22/05/98 y 10/08/98	-0.06	0.065
Entre 10/08/98 y 13/08/99	-0.065	0.07
Entre 13/0899 y 21/10/01	-0.06	0.06

	Umbrales de selección	
	Zonas en las que el NDVI presenta un incremento negativo	Zonas en las que el NDVI presenta un incremento positivo
Entre 21/10/01 y 09/07/04	-0.08	0.06
Entre 09/07/04 y 13/08/05	-0.06	0.075
Entre 13/08/05 y 12/05/06	-0.06	0.065
Entre 12/05/06 y 19/08/07	-0.07	0.07

Tabla 9. Umbrales utilizados para la selección de zonas que presentan incrementos negativos o positivos del NDVI

	Áreas que presentan un incremento negativo del NDVI (ha)	
	RN Pacaya-Samiria	Área de influencia de la RN Pacaya-Samiria
Entre 06/08/85 y 09/08/86	59.3	56.3
Entre 09/08/86 y 03/01/88	23	52.2
Entre 03/01/88 y 29/07/88	83.1	91
Entre 29/07/88 y 14/06/89	23.7	48.7
Entre 14/06/89 y 06/06/92	46.6	110.1
Entre 06/06/92 y 14/07/94	49.3	156.8
Entre 14/07/94 y 19/09/95	88	95.9
Entre 19/09/95 y 03/07/96	35.1	22.9
Entre 03/07/96 y 22/05/98	37.4	66.3
Entre 22/05/98 y 10/08/98	53.3	82.4
Entre 10/08/98 y 13/08/99	14.5	65.4
Entre 13/08/99 y 21/10/01	4.3	62.6
Entre 21/10/01 y 09/07/04	0.5	19.9
Entre 09/07/04 y 13/08/05	40.9	131.6
Entre 13/08/05 y 12/05/06	12.5	64.4
Entre 12/05/06 y 19/08/07	11.6	147.1

Tabla 10. Superficies que presentan un incremento negativo del NDVI entre dos imágenes consecutivas respecto al conjunto del área de estudio.

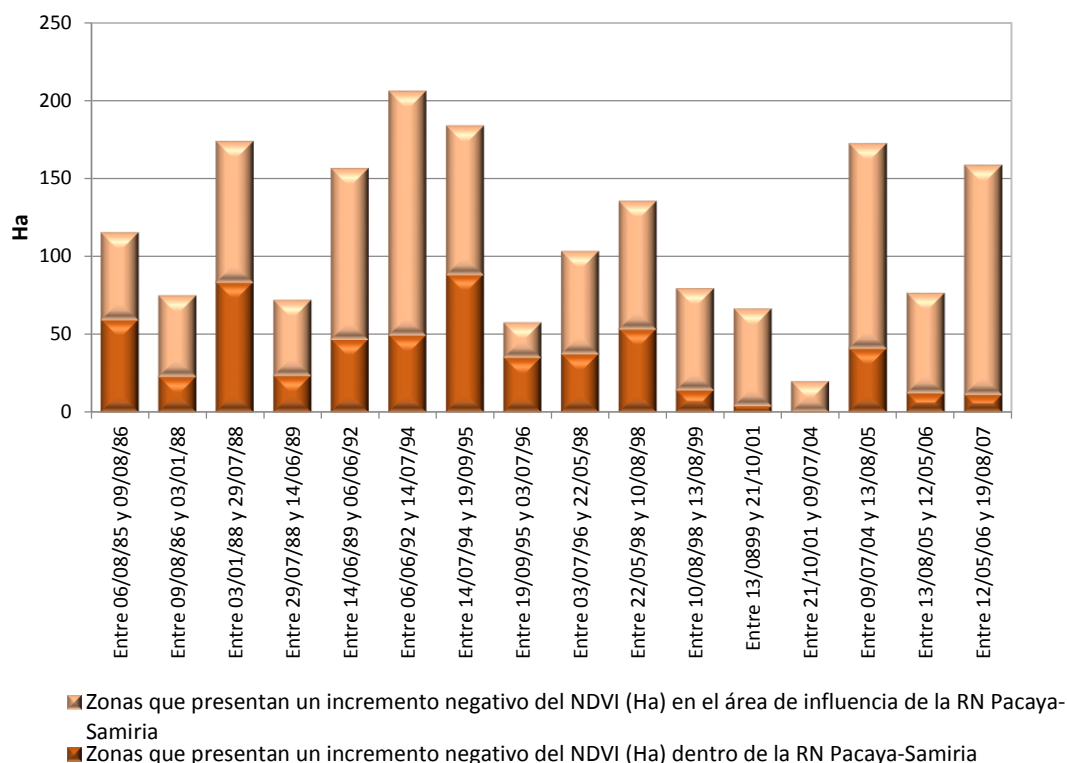


Figura 29. Superficies (hectáreas) en que la vegetación presenta un incremento negativo de la producción primaria medida en NDVI en el interior de la RNPS y en su área de influencia.

Por otra parte, se han calculado también las superficies en las que la producción primaria presenta un incremento positivo entre dos imágenes correlativas. Para ello se han seleccionado los valores de la imagen de la diferencia ponderada del NDVI que se sitúan por encima de un segundo umbral para cada imagen. En este caso los umbrales han variado entre 0.06 y 0.075 (Tabla 9).

Las áreas seleccionadas corresponden a aquellas zonas en las que la producción primaria de la vegetación presenta un incremento positivo mayor entre dos imágenes correlativas y respecto al comportamiento general del conjunto de la cubierta vegetal. Estas superficies corresponden a zonas en las que la cubierta vegetal está recuperándose después de haber sufrido algún tipo de alteración.

La Tabla 11 y la Figura 30 muestran las superficies de terreno en las que el NDVI ponderado ha mostrado un incremento positivo respecto al resto de la imagen.

	Zonas que presentan un incremento positivo del NDVI (ha)	
	RN Pacaya-Samiria	Área de influencia de la RN Pacaya-Samiria
Entre 06/08/85 y 09/08/86	4.9	21.7
Entre 09/08/86 y 03/01/88	46.4	84.5
Entre 03/01/88 y 29/07/88	2.6	31.9

	Zonas que presentan un incremento positivo del NDVI (ha)	
	RN Pacaya-Samiria	Área de influencia de la RN Pacaya-Samiria
Entre 29/07/88 y 14/06/89	41.8	107.2
Entre 14/06/89 y 06/06/92	26.6	27.4
Entre 06/06/92 y 14/07/94	34.2	26.9
Entre 14/07/94 y 19/09/95	33.9	120.7
Entre 19/09/95 y 03/07/96	34.7	83.5
Entre 03/07/96 y 22/05/98	37.5	47.4
Entre 22/05/98 y 10/08/98	19.4	24.2
Entre 10/08/98 y 13/08/99	70.7	49.3
Entre 13/08/99 y 21/10/01	16.1	75.5
Entre 21/10/01 y 09/07/04	1.4	75.3
Entre 09/07/04 y 13/08/05	1.3	12.1
Entre 13/08/05 y 12/05/06	41	14
Entre 12/05/06 y 19/08/07	14	52.1

Tabla 11. Superficies que presentan un incremento positivo del NDVI entre dos imágenes consecutivas respecto al conjunto del área de estudio.

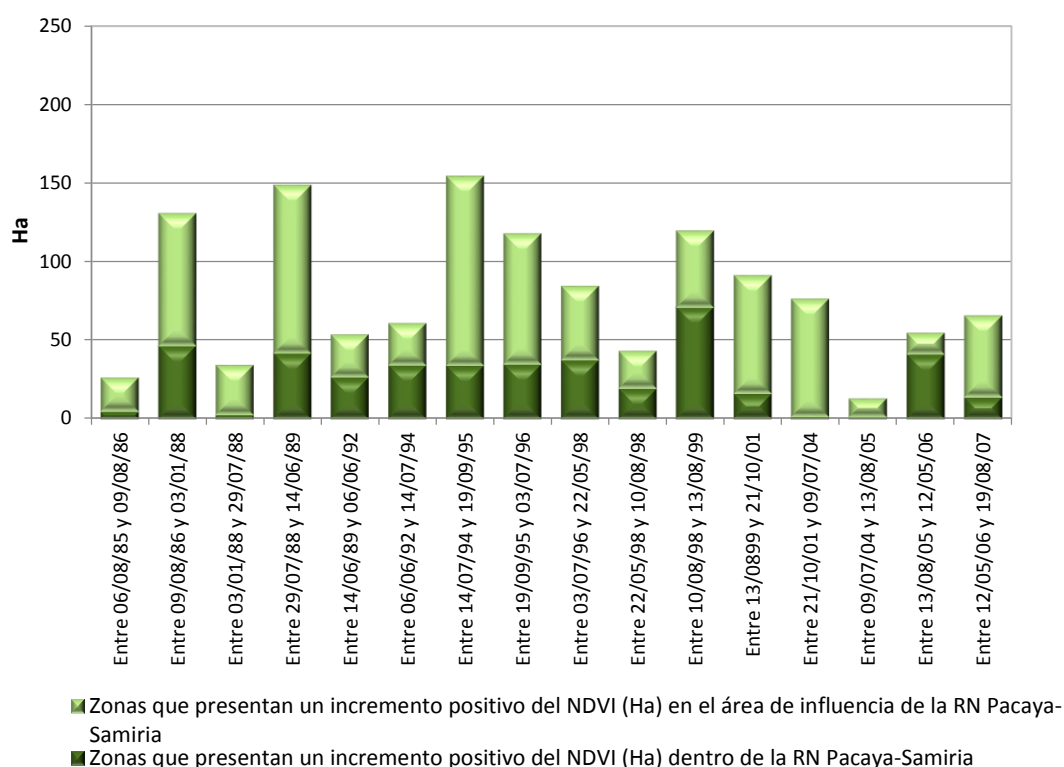


Figura 30. Superficies (hectáreas) en que la vegetación presenta un incremento positivo de la producción primaria medida en NDVI en el interior de la RNPS y en su área de influencia.

La Figura 31 muestra un ejemplo del resultado de identificación de zonas en las que se ha producido un incremento negativo de la producción primaria en la batería de Yanayacu y sus alrededores. La imagen de la izquierda data del 3 de julio de 1986, la imagen central del 22 de

mayo de 1988 y la imagen de la derecha muestra las áreas con incremento negativo del NDVI ponderado.

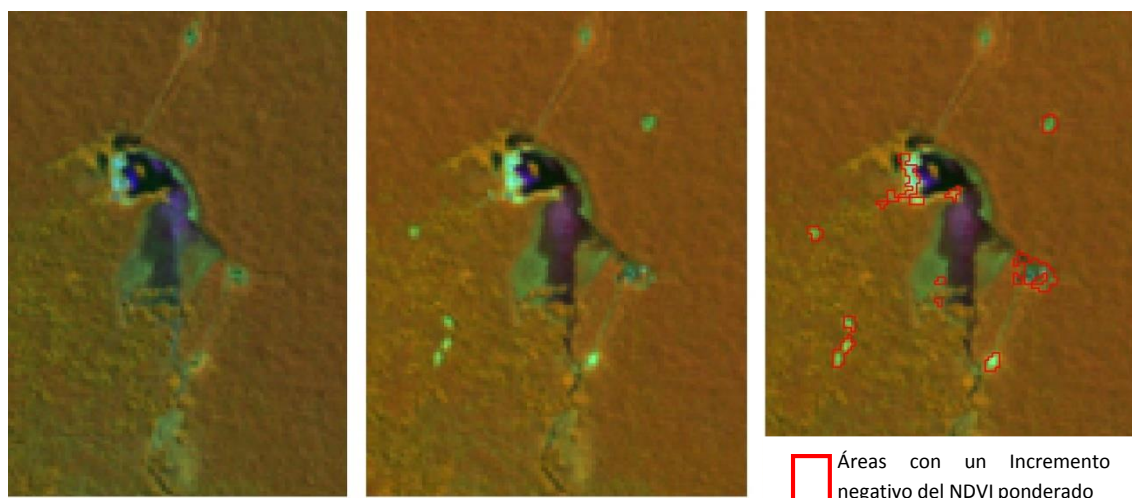


Figura 31. Imagen detallada de la Batería de Yanayacu en las composiciones en falso color del 3 de julio de 1986 y del 22 de mayo de 1988 e identificación de zonas en las que el NDVI ha sufrido un incremento negativo.

La Figura 32 es una vista detallada de la batería de Yanayacu con el conjunto de áreas que presentan un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas. En esta zona, se observa que las superficies con un incremento negativo del NDVI a menudo se superponen. Ello puede deberse a que la superficie en cuestión sufre una degradación continuada de manera que el NDVI presenta siempre una tendencia decreciente, o bien a zonas en las que se suceden episodios que alteran la respuesta de la vegetación, de manera que después de una alteración, la cubierta vegetal se recupera hasta la llegada de un nuevo episodio de alteración.

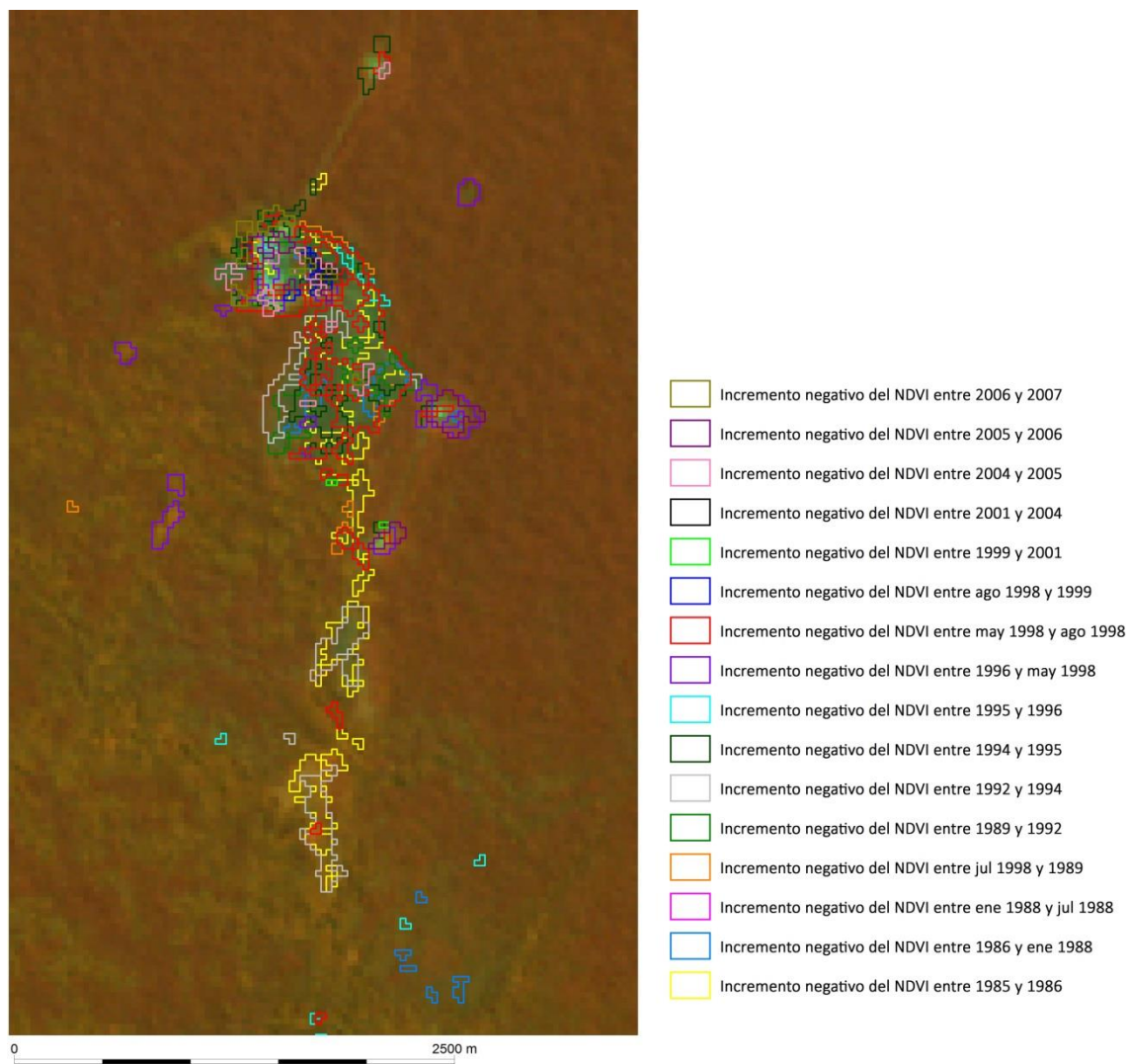


Figura 32. Conjunto de áreas de las inmediaciones de la batería de Yanayacu que presentan un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas.

Debido a que a menudo las superficies que presentan un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas pueden superponerse, el total de la superficie afectada por una disminución del NDVI ponderado no es el resultado de la suma de las superficies que presentan un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas. La Figura 33 muestra las áreas que el NDVI ponderado ha presentado un incremento negativo en una o más ocasiones a lo largo de la serie temporal. La superficie total afectada es de 746.45 ha.

La superficie resultante de la superposición entre las áreas deforestadas en 1985, al comienzo de la serie temporal, y la superficie total afectada por incrementos negativos del NDVI ponderado entre imágenes consecutivas es de 767.14 ha (Figura 34).

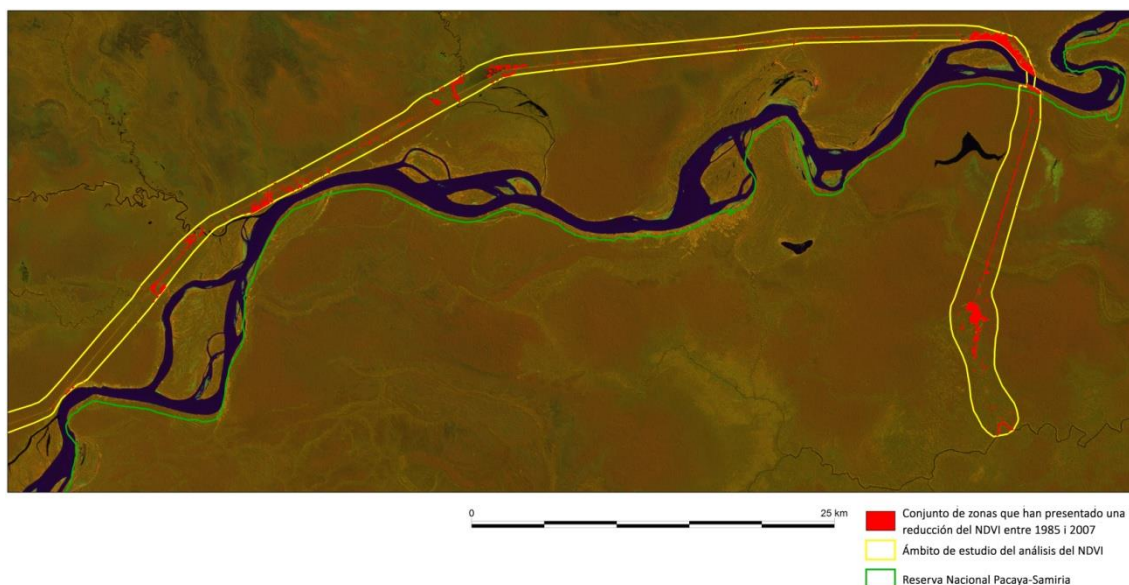


Figura 33. Conjunto de las áreas que en una o más ocasiones han presentado un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas de la serie temporal.

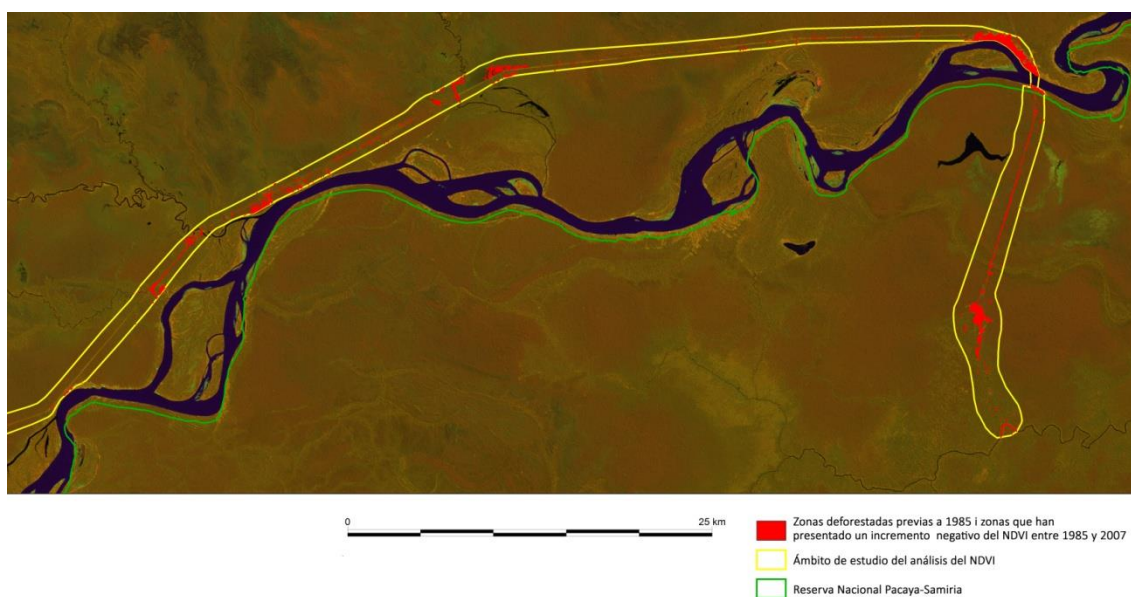


Figura 34. Superficie deforestada en la imagen del 6 de agosto de 1985 o que en una o más ocasiones ha presentado un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas de la serie temporal.

4.4.2 Fotointerpretación de la superficie cubierta por petróleo en las inmediaciones de la batería de Yanayacu

La Tabla 12 y la Figura 35 muestran la evolución de la superficie contaminada cubierta por petróleo en las inmediaciones de la batería Yanayacu, calculada mediante fotointerpretación. En ellas se puede observar que la evolución de la superficie contaminada concuerda

exactamente con lo descrito anteriormente sobre la actividad llevada a cabo en la Batería 3. Entre los años 1985 y 1994, mientras la totalidad de las aguas de formación eran vertidas directamente a la laguna adyacente, la superficie cubierta por petróleo muestra un claro aumento con un promedio de 38.3 ± 23.8 ha de superficie cubierta por petróleo. Esta tendencia se invierte a partir del año 1994, en que se observa un máximo de superficie cubierta por petróleo (67.8 ha) y que coincide con la puesta en marcha de la tubería de descarga hacia la quebrada de Huistoyanayaquillo (año 1995).

A partir del año 1995 y coincidiendo con entrada en funcionamiento de la conducción de las aguas de producción al río Maraón, la superficie cubierta de petróleo decrece considerablemente y se mantiene más o menos estable en los años posteriores.

El estudio también ha incorporado la fotointerpretación de una imagen de alta resolución del satélite SPOT que ha permitido comparar los resultados obtenidos con las imágenes de menor resolución del satélite Landsat (Figura 53). Tal y como puede observarse en la Tabla 12, los resultados de las fotointerpretaciones de las imágenes SPOT del 31 de julio de 2007 y Landsat del 19 de agosto de 2007 son muy similares, manteniendo una ligera reducción de la superficie contaminada en la imagen del 19 de agosto de 2007, que podría deberse a la mayor resolución de la imagen SPOT o bien debido a la variación de territorio inundado.

	Superficie cubierta de crudo (ha)
06-08-85	9.71
09-08-86	21.78
03-01-88	47.57
29-07-88	11.3
19-06-89	60.15
06-06-92	50.17
14-07-94	67.81
19-09-95	44.49
03-07-96	39.13
22-05-98	41.96
10-08-98	42.28
13-08-99	15.81
21-10-01	10.43
09-07-04	5.23
13-08-05	2.78
12-05-06	3.99
31-07-07	2.19
19-08-07	1.82

Tabla 12. Superficies cubiertas por petróleo en las inmediaciones de la batería 3 de Yanayacu en la RNPS.

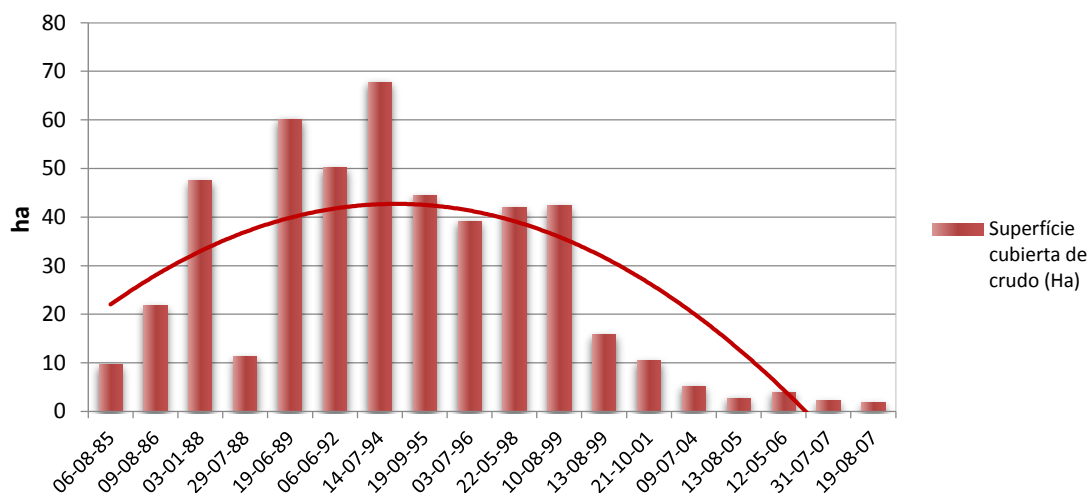


Figura 35. Evolución de la superficie cubierta de petróleo en la batería de Yanayacu en la RNPS entre los años 1985 y 2007.

Las Figuras 36-53 muestran la evolución de la superficie cubierta por petróleo en la batería Yanayacu. Aunque la extensión de la laguna depende de los vertidos de agua de formación, de la precipitación local y de la inundabilidad del terreno, se seleccionó imágenes en la época de vaciante (junio, julio y agosto) para minimizar el efecto climatológico y evitar grandes variaciones en la extensión de terreno inundado.

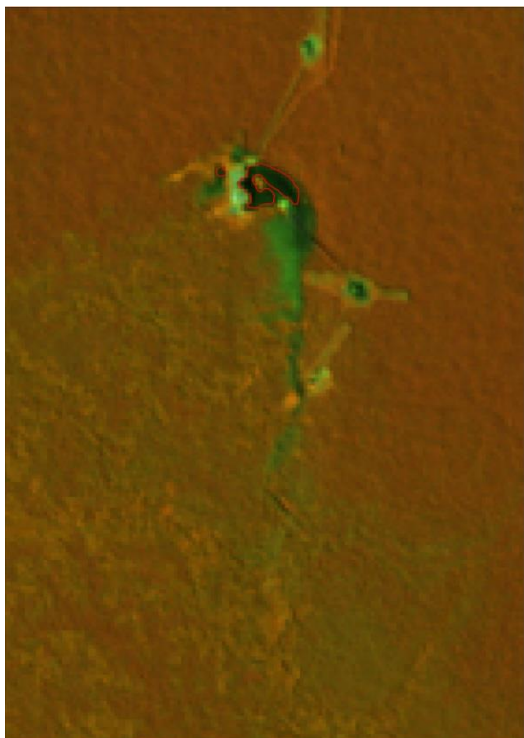


Figura 36. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 06-ago-1985 (Landsat).

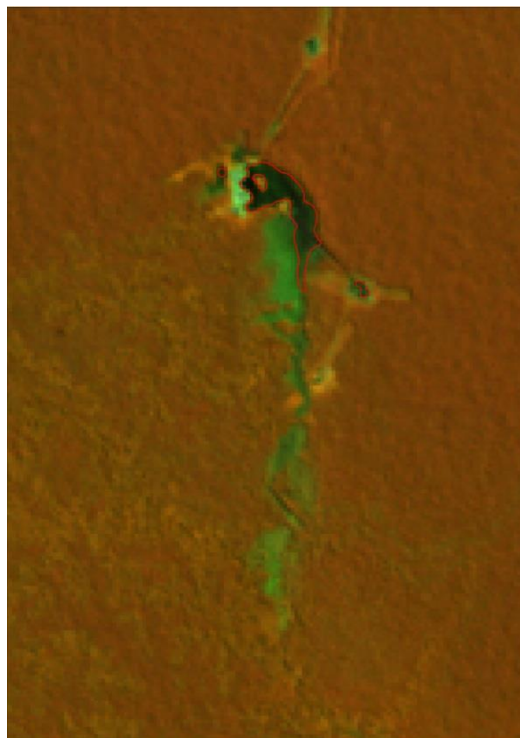


Figura 38. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 09-ago-1986 (Landsat).

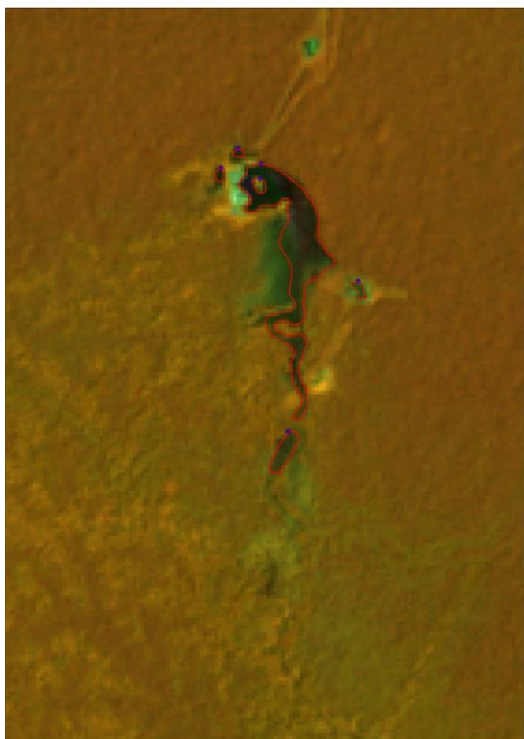


Figura 37. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 03-ene-1988 (Landsat).

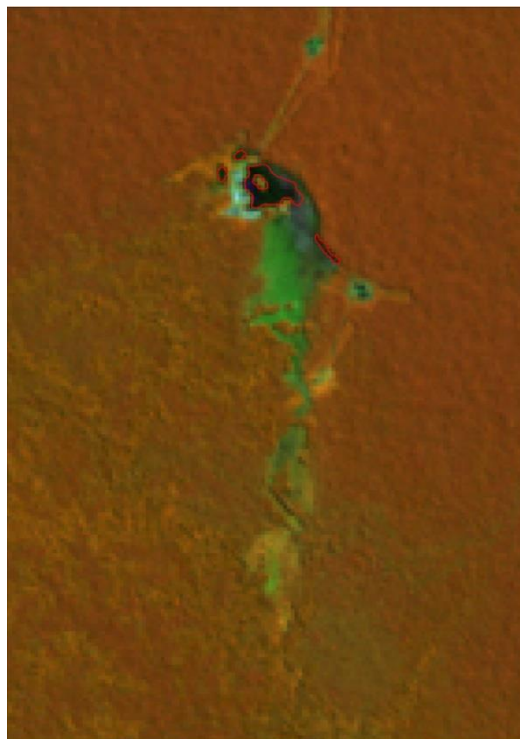


Figura 39. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 29-jul-1988 (Landsat).

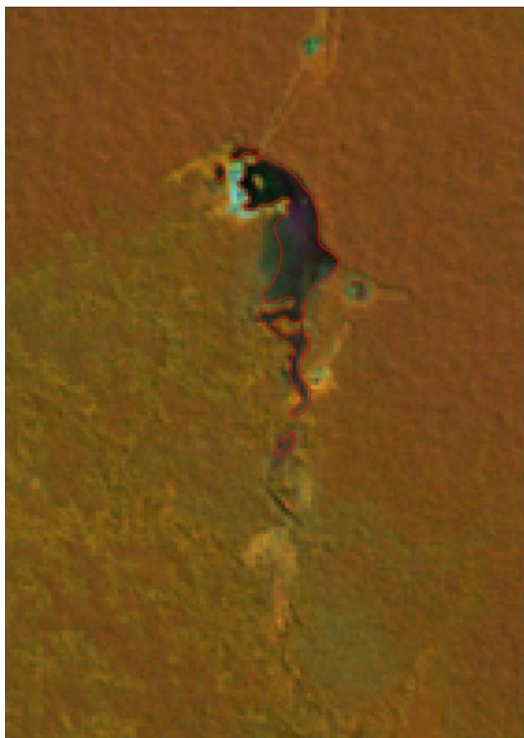


Figura 40. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 14-jun-1989 (Landsat).

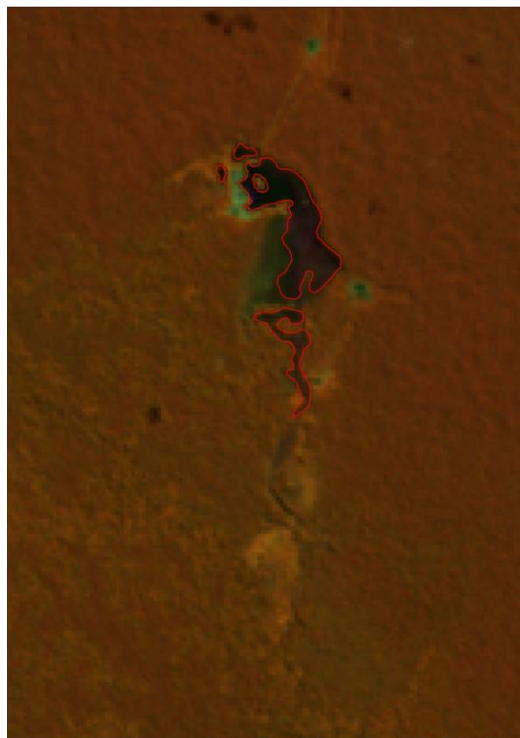


Figura 42. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 06-jun-1992 (Landsat).

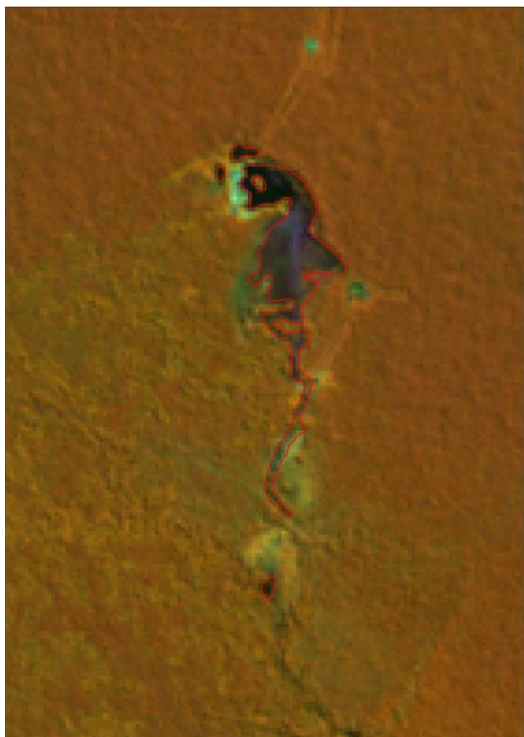


Figura 41. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 14-jul-1994 (Landsat).

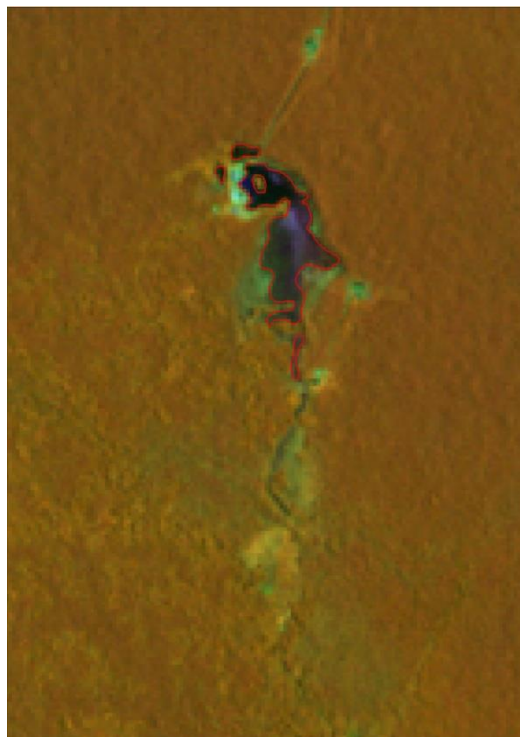


Figura 43. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 19-sept-1995 (Landsat).

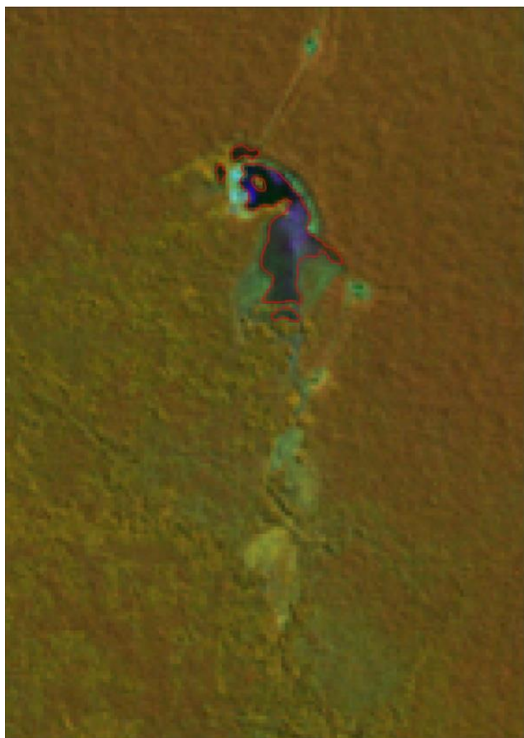


Figura 44. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 03-jul-1996 (Landsat).

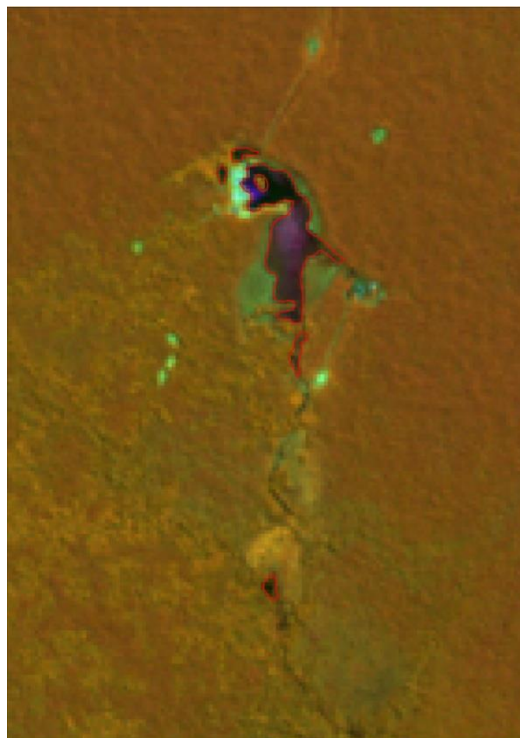


Figura 46. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 22-may-1998 (Landsat).

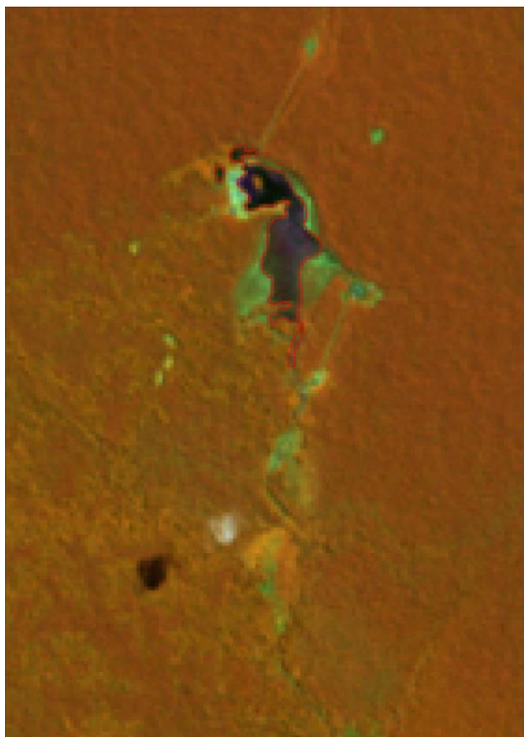


Figura 45. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 10-ago-1998 (Landsat).

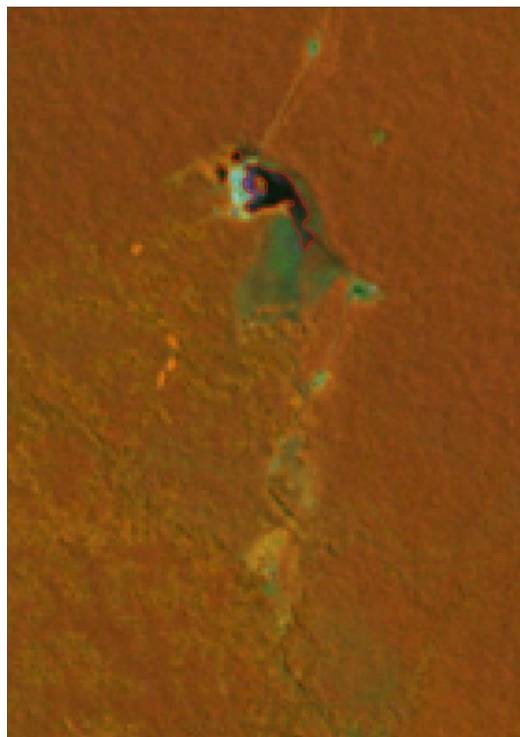


Figura 47. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 13-ago-1999 (Landsat).

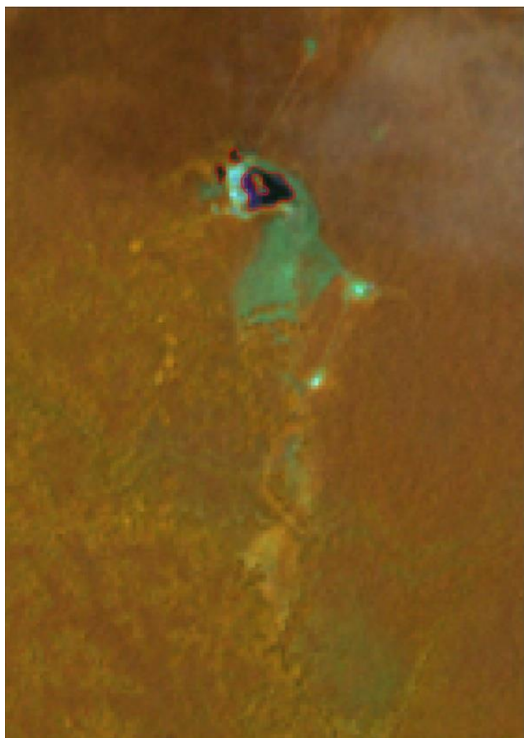


Figura 48. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 21-oct-2001 (Landsat).

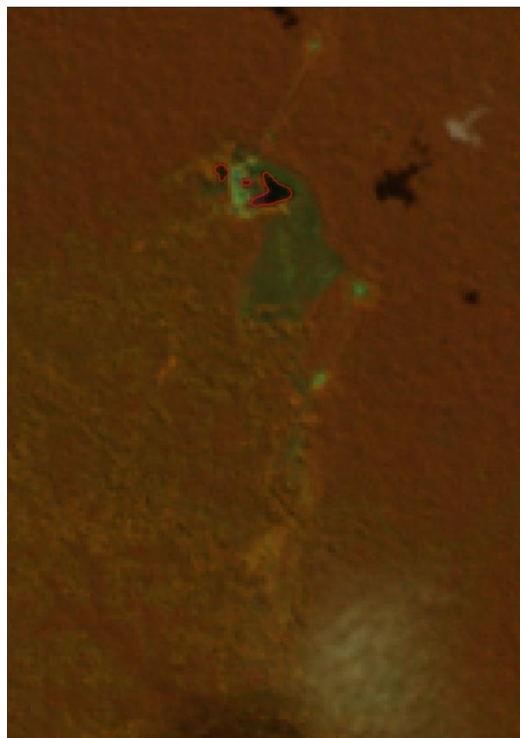


Figura 50. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 09-jul-2004 (Landsat).

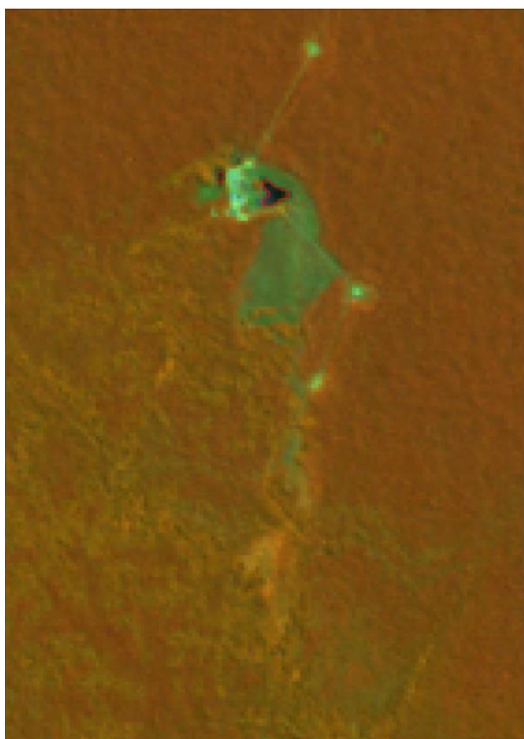


Figura 49. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 13-ago-2005 (Landsat).

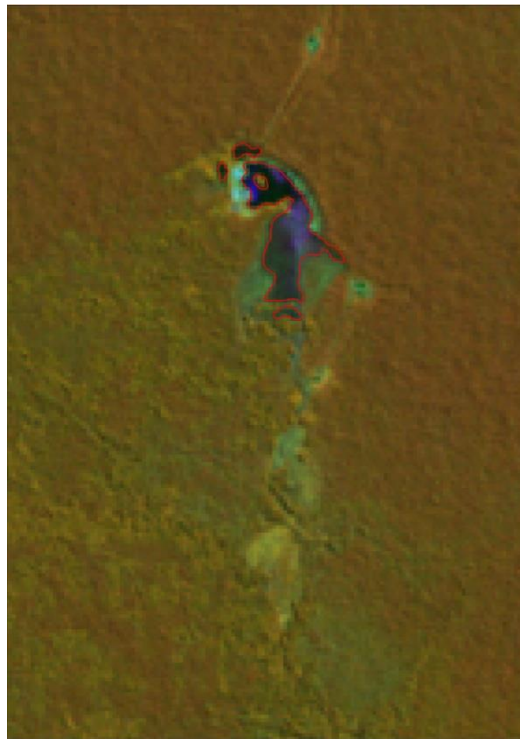


Figura 51. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 12-may-2006 (Landsat).

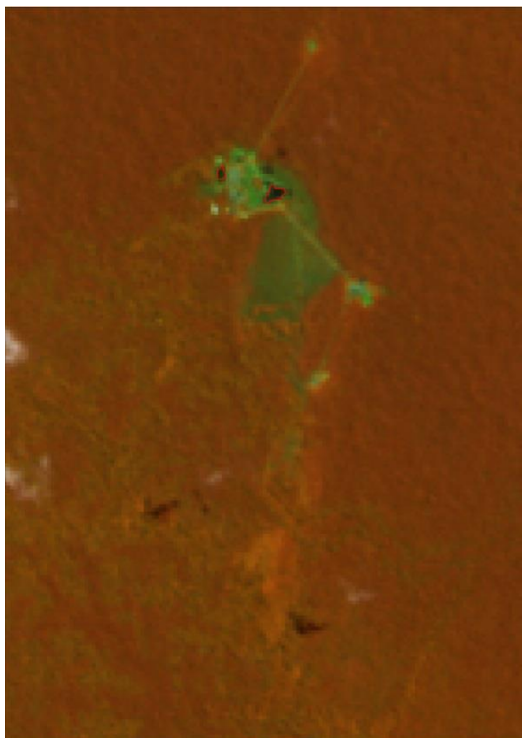


Figura 52. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 19-ago-2007 (Landsat).

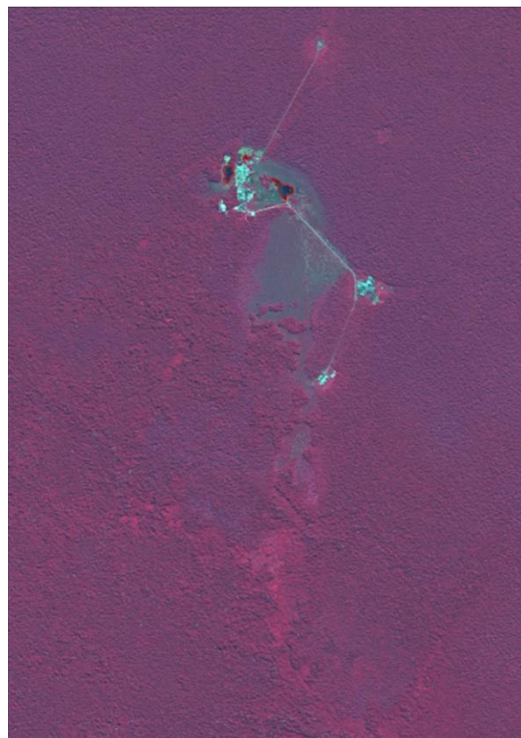


Figura 53. Imagen detallada de la batería Yanayacu en las composiciones en falso color de 31-jul-2007 (SPOT).

4.4.3 Clasificaciones mixtas

La clasificación mixta se obtiene a partir de una clasificación no supervisada y unas áreas de entrenamiento que se delimitan para que el programa las tome como referencia para analizar la respuesta espectral de la categoría en cada una de las bandas que participan en la clasificación.

Se ha realizado una clasificación no supervisada de tipo Isodata para cada una de las imágenes Landsat usando como variables todas las bandas excepto la banda 6, correspondiente al térmico.

El número de categorías resultante es automático y variable en cada clasificación y depende de la discriminación entre diferentes categorías según parámetros como la mínima similitud entre clases, la distancia a la diagonal multivariante, el umbral de convergencia, etc.

La Figura 54 muestra el resultado de la clasificación no supervisada Isodata para la imagen Landsat del 6 de agosto de 1985. El resultado de la clasificación presenta 54 bandas.

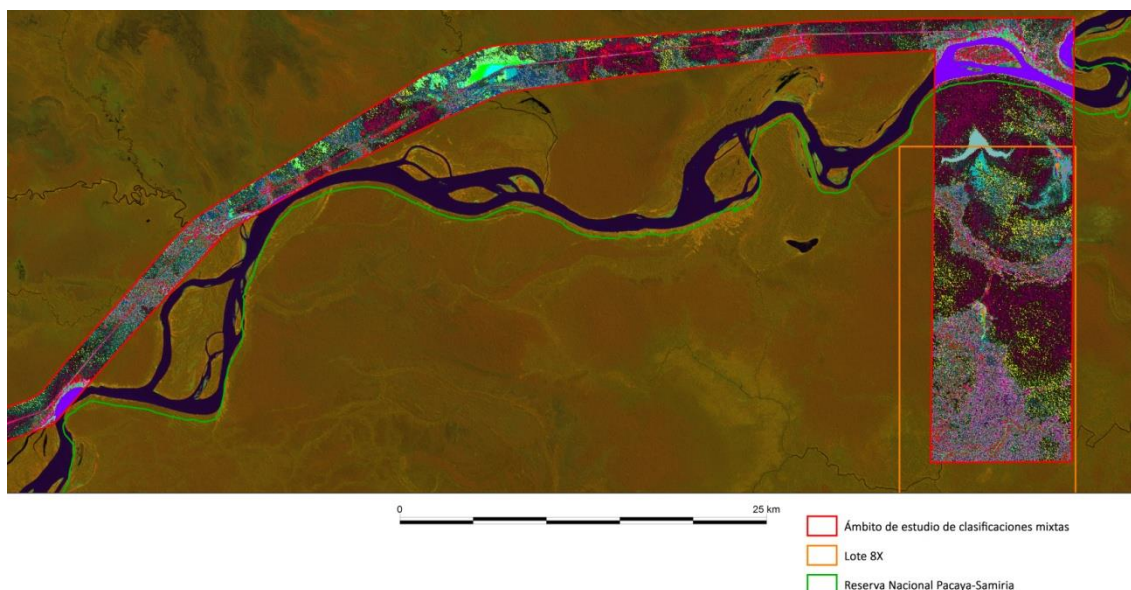


Figura 54. Resultado de la clasificación Isodata a partir de las bandas 1,2,3,4,5 7 de la imagen Landsat del 6 de agosto de 1985.

A partir de los resultados de las clasificaciones Isodata y de áreas de entrenamiento seleccionadas para cada imagen y para cada una de las categorías con interés de identificar, se han realizado clasificaciones mixtas para cada fecha. Las categorías para las cuales se ha identificado un área de entrenamiento han sido: 1) Bosque tropical; 2) Cocha; 3) Río Marañón; 4) Superficies cubiertas por petróleo; 5) Otros ríos; y 6) Suelo con una cubierta vegetal escasa o nula. La Tabla 13 muestra las categorías, la extensión de las áreas de entrenamiento y de la superficie final clasificada y el porcentaje de superficie de la categoría respecto del total del área de estudio y de la superficie clasificada.

La superficie no clasificada corresponde a los píxeles que presentan una diferencia de su respuesta espectral respecto a las áreas de entrenamiento de cada categorías superior a la mínima similitud impuesta.

Cubierta de suelo	Superficie de áreas de entrenamiento (ha)	Superficie clasificada (ha)	% del total del área de estudio	% del total de la superficie clasificada
Bosque tropical	187.1	28.952.7	61.32%	93.22%
Cocha	8.8	273.9	0.58%	0.88%
Marañón	23	1.533.9	3.25%	4.94%
Petróleo	1.4	27.4	0.06%	0.09%
Otros ríos	2.7	227.5	0.48%	0.73%
Suelo desnudo	5	43.8	0.09%	0.14%
No clasificado		16.158.8	34.22%	

Tabla 13. Superficie de las categorías clasificadas mediante la clasificación mixta del 6 de agosto de 1985.

La Figura 55 muestra sobre una composición en falso color, el resultado de la clasificación mixta a partir de la clasificación Isodata del 6 de agosto de 1985. En las Figura 55 y Figura 56 se puede observar que, pese a las áreas de entrenamiento de pequeñas dimensiones aplicadas para la identificación de las superficies cubiertas por petróleo, la zona contaminada en las proximidades de la batería Yanayacu queda muy bien definida y diferenciada del resto de categorías.

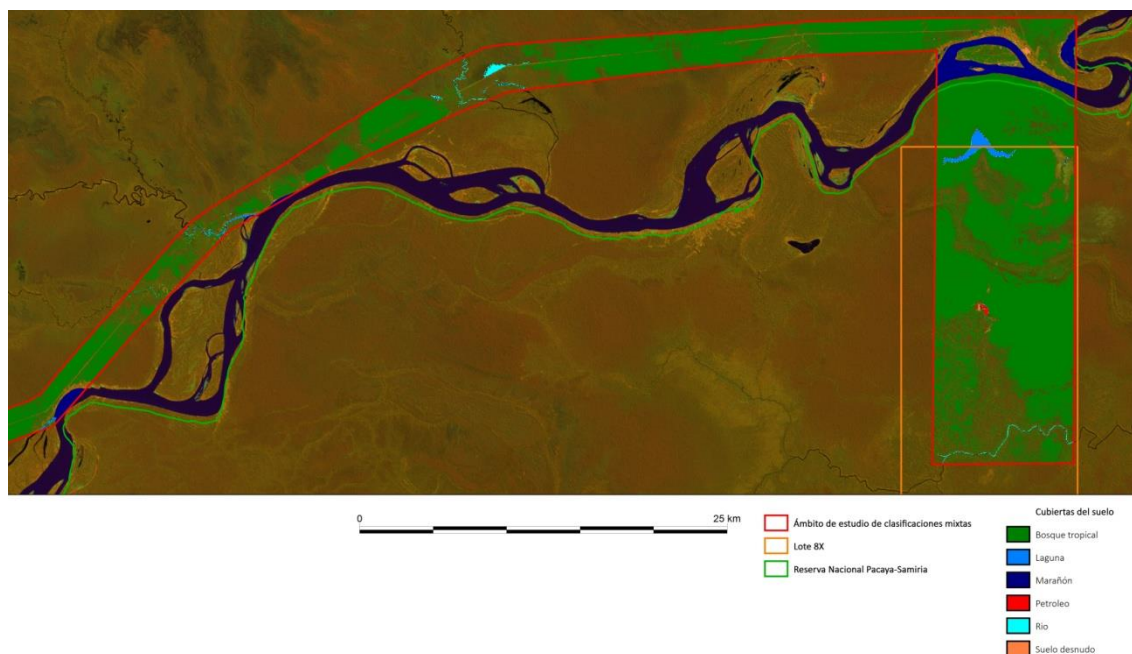


Figura 55. Resultado de la clasificación mixta del 6 de agosto de 1985.

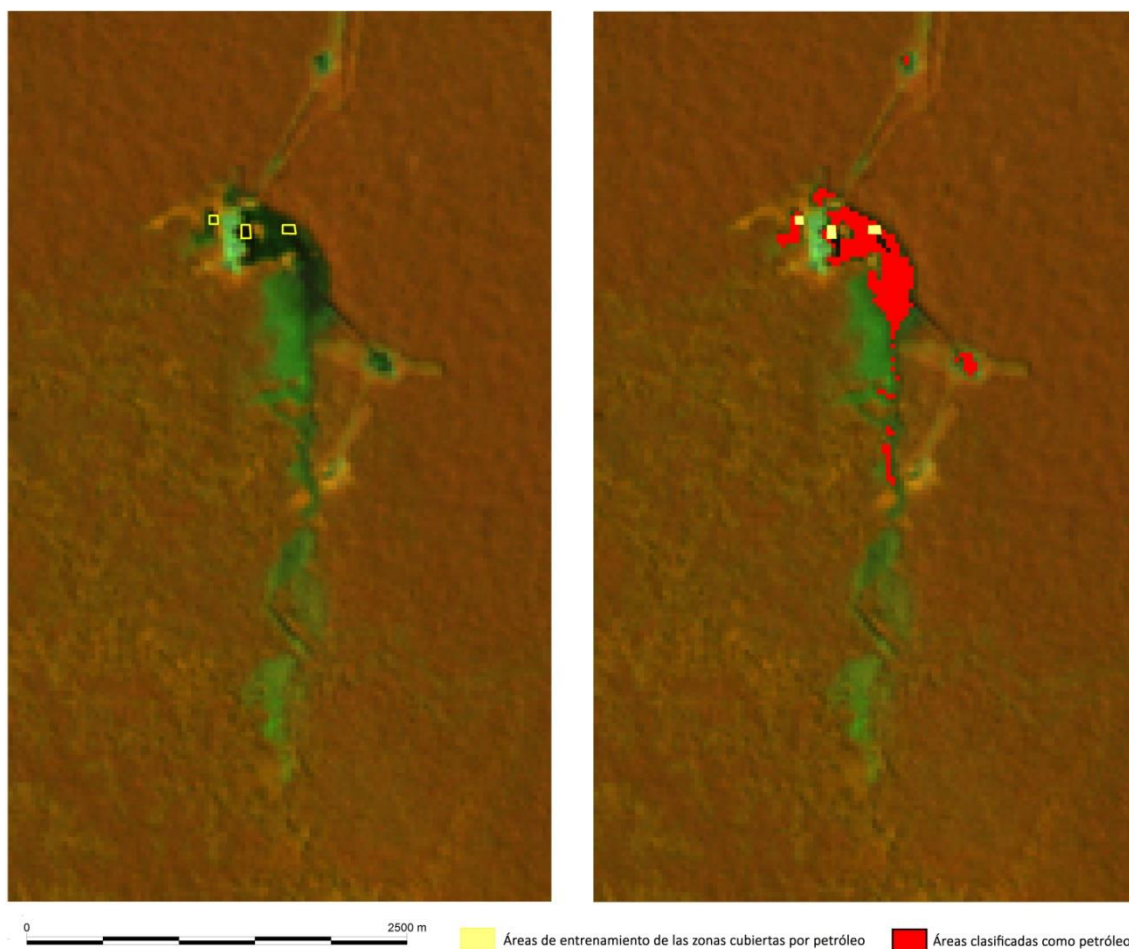


Figura 56. Áreas de entrenamiento de la cubierta de zonas contaminadas por petróleo y resultado de esta categoría en la clasificación mixta de la imagen del 6 de agosto de 1985.

4.4.4 Líneas de prospección sísmica en el interior de la Reserva Nacional Pacaya-Samiria

De acuerdo con las bases cartográficas oficiales sobre las prospecciones sísmicas llevadas a cabo en la Amazonía peruana, en el interior de la RNPS todas las prospecciones datan de la década de los años 70 (anterior a la primera imagen de satélite disponible en 1985), razón por la cual no se ha podido comprobar sus consecuencias en términos de superficie de bosque tropical deforestado.

A pesar de ello, en un estudio realizado en el Lote 1AB se pudo comprobar que en una sección de 144 km de longitud de líneas de prospección, la deforestación directamente asociada a esta actividad era de 16.74 ha, y el efecto de margen considerando los primeros 300 metros, de 34.891 ha.

Teniendo en cuenta estos datos, se ha estimado la longitud total de líneas de prospecciones sísmicas incluidas dentro de los límites de la RNPS. A continuación se ha hecho un cálculo orientativo de las consecuencias directas en forma de deforestación que dichas prospecciones pudieron generar dentro de los límites de la Reserva y las consecuencias indirectas por su efecto de borde (Tabla 14).

La Figura 57 muestra los 6.897.5 km de líneas de prospección sísmica situadas dentro de los límites de la Reserva Nacional según las bases cartográficas oficiales. En base al estudio realizado en el Lote 1AB, las hectáreas que probablemente afectadas en el conjunto de la superficie de la RNPS es de prácticamente 35.000 ha.

Líneas de prospección sísmica en la RNPS		
Longitud (km)	Superficie deforestada orientativa (ha)	Efecto de margen orientativo (ha)
6.897.5	801.43	34.891.29

Tabla 14. Estimación de la deforestación estimada y del efecto margen causados por las líneas de prospección sísmica realizada en 1970 en la RNPS.

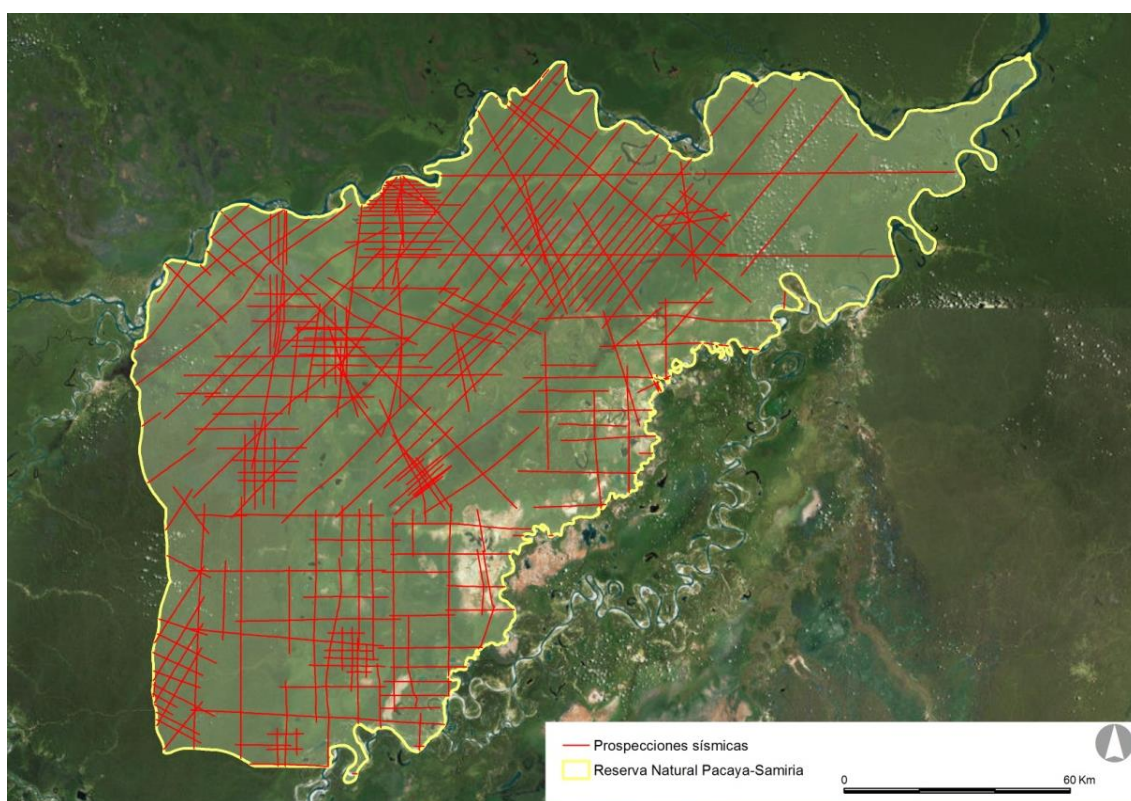


Figura 57. Líneas de prospección sísmica situadas dentro de los límites de la RNPS en base a la información cartográfica oficial de Petroperú.

5. DISCUSIÓN

5.1 INDICADORES DE CONTAMINACIÓN PETROGÉNICA

Los aceites y grasas, el bario y el berilio son compuestos que pueden estar presentes en las aguas de forma natural. En el caso de los aceites y grasas en grandes cantidades debido a la descomposición de materia vegetal (Küchler 2000), y en el caso del bario y berilio en bajas concentraciones (0.003 mg/l y <0.002 mg/l, respectivamente, ATSDR 2008). No obstante, estos compuestos forman parte de la composición de las aguas de producción (Tabla 15; Fakhru'l-Razi, 2009), pudiendo actuar como indicadores de contaminación petrogénica.

Otros metales pesados analizados en este estudio se encuentran de forma natural en los suelos ya que forman parte de la corteza terrestre (arsénico 3-4 mg/kg, boro 8 mg/kg, cobalto 1-40 mg/kg, níquel 4-80 mg/kg, plomo, vanadio 0.0004-0.22 mg/l, estroncio 0.2 mg/kg, litio, titanio (ATSDR 2008) y molibdeno 10 mg/kg (Jambor 2002)). De estos metales, el plomo, boro, titanio, estroncio, litio y arsénico han sido reportados en aguas de producción (Fakhru'l-Razi, 2009), y el níquel y el vanadio aunque no formen parte de la composición de las aguas de formación sí son metales pesados que forman parte del crudo (Reynolds 2004, Barwise 1990, respectivamente). De esta forma, la presencia de estos metales pesados en muestras ambientales podría ser considerada como indicador de contaminación petrogénica.

El cadmio, cromo (incluyendo el cromo hexavalente) y mercurio no se suelen encontrar en aguas o suelos de forma natural, y los niveles altos de este metal pesado están asociados a vertidos industriales, incluyendo contaminación petrogénica (ATSDR 2008).

Los fenoles y los hidrocarburos totales de petróleo (TPHs) son compuestos orgánicos que, a pesar de estar presentes en la naturaleza en pequeñas cantidades, la fuente principal no natural es la contaminación petrolera (ATSDR 2008), por lo que son uno de los contaminantes orgánicos más importantes en relación a la actividad petrolera y el principal indicador de contaminación petrogénica. No obstante, es importante destacar que las fracciones de bajo peso molecular (principalmente medido en base al número de átomos de carbono) suelen ser más volátiles. De esta forma, las fracciones pesadas son mejores indicadores de contaminación petrogénica.

Finalmente, los cloruros son muy escasos en los ríos amazónicos (Horbe 2009) y están muy relacionados con la conductividad del agua. Por lo tanto, los cloruros y la conductividad son buenos indicadores de contaminación petrogénica en muestras de agua.

Consecuentemente, de los compuestos analizados, aceites y grasas, el bario, el berilio, plomo, boro, titanio, estroncio, litio, arsénico níquel, vanadio, cadmio, cromo (incluyendo el cromo hexavalente), mercurio, fenoles, TPHs, cloruros y conductividad son considerados buenos indicadores de contaminación petrogénica, y en especial bario, boro, cadmio, cloruros, cromo (incluyendo el cromo hexavalente), estroncio, litio, mercurio, plomo, fenoles y THP.

Parámetro	Valor
Aceites total (mg/L)	2–565
Aceites volátiles (mg/L)	0.39–35
Aceites y grasas no-volátiles total (µg/L)	275
Ácidos grasos volátiles (mg/L)	2–4900
Aluminio (mg/L)	310–410
Arsénico (mg/L)	<0.005–0.3
Bario (mg/L)	1.3–650
Berilio (mg/L)	<0.001–0.004
Boro (mg/L)	5–95
Cadmio (mg/L)	<0.005–0.2
Cloruros (mg/L)	80–200,000
Cobre (mg/L)	<0.002–1.5
Cromo total (mg/L)	0.02–1.1
Estroncio (mg/L)	0.02–1000
Fenoles (mg/L)	0.009–23
Hierro (mg/L)	<0.1–100
Litio (mg/L)	3–50
Magnesio (mg/L)	8–6000
Manganeso (mg/L)	<0.004–175
Mercurio (mg/L)	<0.001–0.002
pH	4.3–10
Plata (mg/L)	<0.001–0.15
Plomo (mg/L)	0.002–8.8
Sulfatos (mg/L)	10
Titanio (mg/L)	<0.01–0.7
Zinc (mg/L)	0.01–35

Tabla 15. Resumen de la presencia de los compuestos químicos analizados en nuestro estudio en las aguas de formación del mundo (Fuente: Fakhru'l-Razi, 2009).

5.2 EFECTO BATERÍA SOBRE EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN EN AGUAS Y SUELOS

El factor principal que explica la varianza en las concentraciones de los compuestos químicos analizados en muestras de aguas es el año de colecta de muestra. Se encuentran mayores concentraciones de dichos compuestos especialmente en los años anteriores al 2008 (Tabla 3 y Tabla 4). En 2008 cesó el vertido de aguas producidas de la Batería nº 3, reinyectándose en los yacimientos el volumen total de agua producida (Powers 2008). El compromiso para la reinyección del agua producida se estableció en 2006, en los acuerdos del Acta de Dorissa (MINEM 2006), alcanzados tras 13 días de paralización de la producción debido a la toma de pozos por la movilización indígena (Napolitano and La Torre 2007). El periodo donde las concentraciones son mayores es el comprendido entre 1996 y 2000 (Tabla 2 y Tabla 3). Dado que prácticamente no se dispone de datos anteriores a esas fechas, los resultados sugieren que las mejoras en las prácticas operacionales de la industria hidrocarburífera (pozas API, reinyección de aguas de formación, etc.) han sido claves para explicar la calidad de las aguas en la RNPS. Sin embargo, hay que mencionar que las concentraciones de plomo que superan el límite legal siguen siendo elevadas (30.3%) en muestras colectadas después del año 2008 (64.2% para todo el período analizado 1996-2012).

El efecto batería (la ubicación de la muestra según si fue colectada antes o después del punto de vertido) también ha sido el segundo factor en importancia para explicar la varianza de las

concentraciones de los diferentes compuestos químicos: aceites y grasas, conductividad, cloruros, cromo total, cromo hexavalente y fenoles. Para dichos compuestos, su concentración promedio aumenta después del punto de vertido. Un caso particular es el del níquel, cuyas concentraciones disminuyen tras el vertido. Es posible que esta diferencia sea debida a la colecta desigual de muestras ya que prácticamente no tiene muestras anteriores a la reinyección del vertido (2/63). La influencia del vertido de aguas producidas sobre la calidad del agua se ha visto especialmente reflejada en los cloruros. Las concentraciones de cloruros presentan una gran diferencia entre muestras aguas arriba (37.7 mg/l) y aguas abajo del vertido (458 mg/l). Los cloruros son muy abundantes en aguas producidas (Tibbetts 1992) y escasos en ríos amazónicos (Horbe, 2009), siendo precisamente este aporte en gran cantidad de cloruros a través de las aguas de producción el factor que convierte a estos compuestos en un valioso indicador de vertido en el cauce fluvial.

La estacionalidad aparece como otro factor importante para explicar la variación de las concentraciones de cromo hexavalente (1er factor), bario, cromo total, mercurio, plomo (2º factor), grasas y conductividad (3er factor). Los resultados son confusos, mostrando por ejemplo, mayores concentraciones promedio en la época de creciente para el caso del cromo hexavalente. El volumen y el vertido de las aguas de producción es constante a lo largo del año (únicamente relacionado con el volumen de crudo extraído), por lo que se esperaba observar el efecto diluyente de la creciente debido al mayor caudal de los ríos. La gran variabilidad interanual en el régimen hídrico (Bodmer et al., 2014) podría explicar parte del comportamiento de dicho factor, cuya importancia esperábamos mayor dado la naturaleza inundable de la zona de estudio.

La cuenca de procedencia de la muestra sólo aparece como factor determinante en la explicación de la varianza en el caso de los aceites y grasas y el bario (3er factor). Es probable que la falta de homogeneidad en la colecta de muestras (en cuenca del Marañón se colectaron 347 muestras de agua; 29 en Huistoyanayaquillo y 26 en Samiria) no haya permitido que se evidencie estadísticamente el factor cuenca, altamente relacionado también con el efecto diluyente debido al caudal de los diferentes ríos.

La diversidad de metodologías de colecta y métodos de laboratorio empleados, así como la falta de rigurosidad y consistencia en la selección de la ubicación de los puntos de muestreo o de los parámetros analizados representan un claro limitante para el estudio presentado. Sólo los parámetros aceites y grasa, bario, conductividad, cloruros y plomo han sido analizados con cierta homogeneidad durante el período de estudio. Los primeros análisis de cromo total, níquel y TPHs se realizan en el año 2006; y el análisis de cromo VI sólo se realizó entre los años 1997 y 2000. Se ha constatado que muchas muestras antes y después del vertido se tomaron en días distintos (datos no pareados) y en un gran número de casos no se dispone de muestras aguas arriba. Las muestras se han analizado con distintos métodos laborales (y diversos LD). Todo ello ha limitado el alcance de este estudio y dificulta la interpretación de los resultados.

En cuanto a los análisis de suelos, la distancia ha sido el factor principal para entender las diferencias en quince de las diecinueve variables estudiadas (Tabla 4). Los indicadores de contaminación petrogénicos más importantes (bario, cadmio, plomo, cromo y TPHs) muestran

mayores concentraciones en zonas cercanas a los puntos de contaminación, observándose un efecto dilución/dispersión a medida que se aleja el punto de colecta del punto de vertido (Figura 10). De ello se desprende una relación causal entre las concentraciones de dichos compuestos y el vertido de aguas de producción. Las concentraciones más elevadas de los contaminantes se dan a distancias que no pasan de 400 m en su mayoría, apuntando a que la contaminación se concentra en las zonas cercanas a los focos contaminantes. El caso del plomo es interesante porque, aunque presenta mayores concentraciones en localidades a menos de 150 metros del punto de vertido, es detectado a lo largo de todo el transecto, incluso a distancias superiores a 1.5 kilómetros. Litio, níquel, titanio y vanadio presentan mayores concentraciones en muestras colectadas a distancias superiores a 1.5 kilómetros.

Es necesario tener en cuenta que las muestras de suelos se concentran mayoritariamente dentro del rango de 1 kilómetro a las instalaciones de la batería nº3 (n=73) y solamente se han colectado trece muestras a más de 1 kilómetro del foco de contaminante más cercano (en su mayoría a distancias mayores a los 40 kilómetros). Dicha estructuración de los datos limita la robustez del estudio. Se aconseja realizar colectas sistemáticas de muestras a distancias fijas respecto al punto de vertido (transectos) para poder evaluar mejor la pluma de dichos compuestos petrogénicos respecto al punto de vertido, generando valiosos inputs para entender su transporte y dispersión.

El limitado rango temporal de las muestras (1997 y 2012-2015), así como el hecho que los suelos pueden actuar como sumidero de dichos compuestos, mostrando en mayor medida que las aguas la exposición crónica a la actividad hidrocarburífera, dificulta poder evaluar el efecto del cambio de los estándares operacionales. Por ello, el factor “año de colecta” no ha resultado relevante en la explicación de la varianza. La cuenca tampoco ha mostrado ser un factor relevante.

En este estudio estadístico se han excluido 38 de los 52 compuestos químicos analizados en agua y suelos por distintos motivos: a) No se dispone de suficientes datos para su correcto análisis; b) Los datos son en su totalidad valores LD, como en el caso de los hidrocarburos policíclicos en aguas y de TPHs totales, TPHs de C6-10/C28-40 en suelos; c) Los resultados están influenciados por factores ajenos a la contaminación petrolera. En el caso de muestras de agua se excluyó el estudio del hierro -movilizado en aguas durante la época de inundación por ser muy abundante en la corteza terrestre (U.S. EPA 1978)-; del oxígeno disuelto -dependiente del régimen hidráulico del río y de la cantidad de materia orgánica disuelta (Küchler, 2000)-; del pH -dependiente del tipo de sedimento fluvial- y de la temperatura -dependiente de varios factores naturales y con muy poca variación en la base de datos-. En el caso de muestras de suelos se excluyó potasio, magnesio, sodio y óxidos de silicio; d) El modelo estadístico no ha alcanzado a explicar el 15% de la varianza debido a la falta de homogeneidad en la colecta de las muestras de agua y suelos en el caso de arsénico, cadmio y zinc.

Nuevamente, la diversidad de metodologías de colecta y métodos de laboratorio empleados, así como la falta de rigurosidad y consistencia en la selección de la ubicación de los puntos de muestreo o de los parámetros analizados representan un claro limitante para evaluar la contaminación de los suelos en la RNPS. Consecuentemente, recomendamos realizar un trabajo de sistematización y un diseño programado de colecta de muestras para mejorar la calidad del monitoreo ambiental para mejorar la evaluación ambiental de la zona.

5.3 DISCUSIÓN DE LA COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES LEGALES

La comparación de las concentraciones de los diferentes compuestos químicos analizados en de las muestras de agua y suelo que integran la base de datos, con los límites legales (Límite Máximo Permitido, en adelante LPM) nacionales e internacionales tiene un doble función. Por un lado, nos permite evaluar la magnitud de la problemática y, por el otro, nos permite evaluar las implicaciones legales y administrativas de dicha contaminación.

La comparación del conjunto de la base de datos de muestras de agua (colectadas entre 1996 y 2015) indica una contaminación severa por múltiples compuestos químicos. De hecho, para todos los compuestos que poseen un límite legal en el Decreto Supremo Nº 2- 002-2008. Categoría 4: Ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008) hay muestras cuyas concentraciones superan los límites legales (Tabla 4). El plomo presenta los mayores porcentajes de muestras con concentraciones sobre el límite legal vigente, un 64.2%. Otros compuestos de origen petrogénico como el cromo hexavalente (10.5%), el cadmio (14.5%) y los fenoles (18.3%) presentan un porcentaje considerable de concentraciones sobre el límite legal. Sin embargo, estos valores no se pueden considerar necesariamente ilegales, ya que pueden proceder de análisis anteriores a la fecha de entrada en vigor de la normativa en 2008.

El caso del mercurio merece atención especial. Un 57.1% de las muestras han sido analizadas con métodos de laboratorio cuyos LD superan el LMP. Ello indica una selección de métodos de laboratorio claramente inapropiados para la legislación vigente. Problemáticas parecidas ocurren con el plomo (22.5%) y el cadmio (6.8%).

TPHs y aceites/grasas no están regulados en la Categoría 4 (Ríos de Selva) del Decreto Supremo Nº 002-2008-MINAM (Ministerio del Ambiente 2008). No obstante, considerando el límite legal contemplado en la Categoría 1 -Agua apta para potabilización- (Ministerio del Ambiente 2008) se ha observado una problemática clara debido a las elevadas concentraciones de TPHs y aceites/grasas en el agua de la RNPS, como lo demuestran los altos porcentajes de muestras sobre los límites legales (25.1% y 33.6 % respectivamente).

El número de muestras con concentraciones que superan el límite legal es mucho mayor si se considera como referencia la normativa canadiense (Canadian Council of the Environment 2001). Con ésta el porcentaje por encima de los LMP aumenta para todos los metales pesados, destacando el cadmio (98.5%) y el cromo hexavalente (66.7%). En el caso de ciertos Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs), como el benzo(a)pireno, el 17.9% de las muestras han sido analizadas con métodos de laboratorio cuyos LD superan el LMP, resaltando nuevamente la inapropiada selección de dichos métodos.

La normativa Europea (Council of the European Union 1998) reporta porcentajes muy similares a los de la normativa nacional en la categoría 1 (Ministerio del Ambiente 2008).

En cuanto a muestras de suelos se observa nuevamente una contaminación severa por múltiples compuestos químicos. Es el caso de los TPHs (51% para C10-C28; 28% para C28-C40), bario (19.2%), plomo (13.3%), cromo hexavalente (5.8%) y cadmio (5.0%). Las elevadas concentraciones de TPHs pueden deberse en parte a que todos los valores de TPHs proceden de reportes públicos dirigidos a evaluar derrames detectados en el oleoducto Norperuano

(Documento nº 10 del Anexo 3: Informe 846 OEFA/DS-HID, 819-2014 OEFA/DS-HID y documento nº 6 del Anexo 3: informe 379-2014 OEFA/DS-HID), o de reportes que analizan suelos en las instalaciones de la batería Yanayacu (Documento nº 3 del anexo 3: Nº020-2014-OEFA-DE-SDCA). Ambas son zonas más expuestas a contaminación directa por vertidos de crudo y no de aguas de formación.

Al comparar con la normativa canadiense de suelos (Canadian Council of the Environment 2006) los resultados son muy similares a los reportados para la normativa nacional, a excepción del talio (20.5 %) y uranio (40 %); si bien el volumen de muestras de uranio (n=5) es demasiado bajo para ser representativo.

En general se ha observado que hay una cierta correspondencia entre resultados de suelos y agua, apuntando a que la fuente de contaminación tanto en agua como en suelos es de similar composición y procedencia.

La comparativa durante los periodos de vigencia de las normativas actuales en agua (2008-2015) y suelos (2013-2015) permite ver la incidencia de contaminación en un contexto en que las muestras con concentraciones que superan los LMP si son de facto valores ilegales, ya que fueron colectadas y analizadas posteriormente a la entrada en vigor de la normas.

Entre 2008-2015 las muestras de aguas presentan porcentajes algo menores que para el periodo global (1996-2015), pero aun así significativos: para 5 de un total de 7 compuestos se han reportado concentraciones superiores al LMP, sobretodo en plomo (30.3 %), confirmando que la contaminación en agua sigue estando presente y siendo diversa en la RNPS incluso tras la reinyección de los vertidos. De nuevo este resultado es muy importante, pues oficialmente no hay vertidos de aguas producidas desde 2008. No se conocen otras fuentes de contaminación aparte de la actividad petrolera. Se considera que la contaminación puede deberse a derrames de crudo, antiguos sumideros de contaminantes (e.g., áreas PAC) que estarían actuando ahora como fuentes de contaminación difusa. Cabría la posibilidad de que la reinyección no se haya dado de forma satisfactoria. No se puede confirmar los motivos pero si el hecho que desde 2008, cuando supuestamente no hay vertidos de agua producida, se han encontrado muestras de agua que superan el límite vigente en plomo (30.3%) pero también en níquel (6.6%), arsénico (1.6%) y cadmio (0.8%).

También durante 2008-2015 un 45.0% de las muestras han sido analizadas para el mercurio con métodos de laboratorio cuyos LD superan el LMP. Ello indica una deficiente elección de los métodos de análisis, con muy poca sensibilidad y claramente inapropiados para la legislación vigente incluso en épocas recientes. Se desconocen los motivos que han llevado a las instituciones responsables de los análisis a elegir estos métodos de medida.

En suelos el periodo 2013-2015 no reportan grandes diferencias respecto a los resultados anteriores, pues solo excluye a nueve de 145 muestras del total. Destacan los TPHs C10-C28 (51%), TPHs C28-40 (28%), el plomo (13.2%), el bario (18.4%), el cromo hexavalente (5.8%) y el cadmio (5.2%).

En líneas generales, se han reportado concentraciones sobre el límite legal vigente para casi todas las variables reguladas de aguas y suelos, apuntando a una contaminación por diversos compuestos, incluso si solo se considera únicamente el periodo posterior al cese del vertido de aguas producidas en la RNPS.

5.4 DISCUSIÓN DE LOS MAPAS DE DISTRIBUCIÓN

El agua es el principal vector y distribuidor de la contaminación provocada por las actividades petroleras, permitiendo ampliar el impacto desde una zona concreta a zonas más distantes. De esta forma, el estudio espacial del nivel de contaminantes a lo largo de los ríos permite entender la magnitud espacial de la contaminación y el efecto diluyente de los cursos de agua.

El Decreto Supremo Nº2 002-2008-MINAM. Categoría 4: Ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008) no incluye límites máximos permitidos para aceites y grasas, berilio, boro cobalto, estroncio, litio, molibdeno, vanadio, titanio y THPs. La legislación nacional no contempla importantes indicadores de contaminación petrogénica. Por otro lado, mientras que el cromo total medido en muestras de agua no presenta valores superiores a los límites permitidos sugiriendo que no supone un problema; en la mayor parte de muestras de aguas el mercurio está analizado laboratorialmente con metodologías cuyo límite de detección es superior al límite legal, y aunque la metodología es inapropiada e incapacita la posibilidad de estudiar correctamente este indicador, sugerimos que posiblemente no supone un problema de contaminación. De esta forma, el análisis espacial de contaminantes se centró en el estudio de arsénico, bario, cadmio, cromo VI, fenoles, níquel y plomo.

La distribución en agua de los contaminantes estudiados y regulados en el Decreto Supremo Nº2 002-2008-MINAM. Categoría 4: Ríos de selva (Ministerio del Ambiente 2008) muestra tres zonas en las que se ubican las muestras de agua con mayor nivel de contaminación:

- Las inmediaciones de la batería nº3 y de las plataformas 60 ,32 y 38, con muestras que superan los límites legales en plomo, cadmio y bario.
- El antiguo punto de vertido de la batería nº3 en el río Marañón con un rango de 500 metros de distancia a través del río antes y después de la batería. Todos los compuestos analizados tienen muestras en esta zona que superan los límites legales y es la zona que reporta el mayor número de valores elevados. Esta abundancia de muestras con concentraciones de contaminantes sobre el límite legal se justifica por la cercanía al punto de vertido y porque el río Marañón acumula 347 de las 420 muestras totales de agua.
- El antiguo punto de vertido de la batería en la quebrada Huistoyanayaquillo con un rango de 500 metros de distancia a través del río antes y después de la batería. El cadmio, cromo VI, fenoles y plomo presentan concentraciones que superan en esta zona los límites legales. Esta quebrada es la que mejor refleja la contaminación debido a su pequeño caudal y a que la mayor parte de las muestras se tomaron en el periodo de vertido activo. Por otro lado, este hecho nos impide evaluar su estado actual y estimar la evolución temporal de la contaminación.

Prácticamente toda la contaminación de agua se concentra en estas tres zonas. No obstante, la colecta de muestras no sistematizada y homogénea a lo largo de los ríos no permite estudiar con profundidad el gradiente de concentración de los contaminantes debido al efecto diluyente del agua. De los siete compuestos químicos analizados, el plomo es el metal pesado que permite entender mejor esta dinámica debido a su mayor tamaño muestral. Los mapas de distribución de plomo muestran que la contaminación por plomo es la más extendida, aguas abajo de los

puntos de vertido. Aunque el plomo se encuentra de forma natural en el suelo, la existencia de muestras de agua que superan el límite legal $>10000\%$ cerca de la batería nº3 y del punto de vertido de la batería en la quebrada Huistoyanayaquillo nos permite afirmar que el aporte de plomo de los vertidos es significativo, y que éste se ha distribuido a lo largo de los cursos de agua. Las concentraciones de plomo en muestras de agua alcanzan valores muy altos en el río Samiria y Marañón incluso a decenas de kilómetros de la batería o los puntos de vertido. Esta situación sugiere que existen otras fuentes de contaminación en el curso del río Marañón, posiblemente petrogénicas; aunque no podemos negar la posibilidad de aportes menores debido al plomo que se encuentra de forma natural en los suelos (ATSDR 2008). Aunque no podemos afirmar que estas muestras de agua con elevadas concentraciones de plomo sean de origen petrogénico, no podemos negar esa posibilidad. Sería necesario estudiar la concentración isotópica de este plomo para poder confirmarlo.

En definitiva, la distribución de muestras de aguas contaminadas con compuestos químicos que son buenos indicadores de contaminación petrogénica nos permite asegurar que ha habido contaminación en los cursos de agua de la zona donde se están desarrollando actividades petroleras y que ésta es más concentrada en los sitios de origen y es transportada a través del agua, aunque únicamente el plomo es aparentemente el metal pesado cuya presencia se encuentra en lugares alejados a la fuente petrogénica. En cualquier caso, es recomendable establecer un sistema de monitoreo estandarizado con colecta de muestras que permita entender el efecto diluyente del agua y, por lo tanto, la magnitud espacial del impacto debido a la contaminación petrogénica.

Debido a la menor movilidad de los suelos respecto al agua, la distribución espacial de la contaminación en muestras de suelo permite asociarla más directamente a las probables fuentes contaminantes. La colecta de muestras de suelos realizada por las instituciones públicas y privadas se ha circunscrito principalmente a las zonas donde se localizan las infraestructuras petroleras. De esta forma, el análisis espacial nos permite evaluar claramente el impacto local de estas instalaciones, pero nos dificulta entender cuál es la movilidad de esta contaminación, y por lo tanto entender mejor el alcance espacial de esta contaminación en suelos.

El Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques (Ministerio del Ambiente 2013) no incluye límites máximos permitidos para aceites y grasas, berilio, boro cloruros, cobalto, cromo total, estroncio, litio, mercurio, molibdeno, níquel, vanadio y titanio. La legislación nacional no contempla importantes indicadores de contaminación petrogénica. De esta forma, el análisis espacial de contaminantes se centró en el estudio de plomo, cadmio, arsénico, bario y TPHs.

Cuando distribuimos las muestras de suelo con concentraciones de estos compuestos químicos sobre el límite legal que indica el Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM. Categoría suelo residencial/parques (Ministerio del Ambiente 2013) observamos que las mayores concentraciones se encuentran localizadas en zonas cercanas a las fuentes de vertido:

- Área próxima a las instalaciones de la batería nº 3. Plomo, cadmio, arsénico, bario y TPHs de C10-C28 y C28-C40 tienen valores superiores a los límites legales.

- Oleoducto que comunica la batería n°3 con el río Marañón. Plomo, cadmio, arsénico, bario y TPHs de C10-C28 y C28-C40 tienen valores superiores a los límites legales.
- Área del oleoducto Norperuano Km 20+190, al Norte del río Marañón a la altura de la localidad de San Pedro. Se observan concentraciones ilegalmente elevadas de cromo VI y TPHs de C10-C28 y C28-C40.
- Área cerca del río Cuninico en el cruce con el oleoducto Norperuano km 41+833, donde se localizan las muestras con concentraciones ilegales de TPHs de C6-C10, C10-C28 y C28-C40.

Los TPHs son en suelos los compuestos de mayor número de muestras que superan el límite legal. Probablemente esta elevada cantidad de muestras que superan los límites legales sea debido a que son muestras asociadas a derrames localizados. Los TPHs de C10-C28 (51%) y de C28-C40 (28%) presentaron un mayor porcentaje de muestras ilegales debido a que son más pesados y menos volátiles, por tanto más persistentes en el medio ambiente en relación a los TPHs de C6-C10, y permanecen más tiempo en el lugar del derrame.

La presencia de elevadas concentraciones de metales pesados indicadores de actividad petrogénica (plomo, cadmio, arsénico y bario) en colecta de muestras que forman parte del monitoreo regular de las actividades petroleras y que superan ampliamente los niveles permitidos de nos permite afirmar que en las inmediaciones de las infraestructuras petroleras (batería y oleoductos) de la RNPS existen evidencias de contaminación petrogénica no puntual. No obstante, no se ha realizado un muestreo sistemático en suelos próximos a los oleoductos, de tal forma que no podemos evaluar el estado de contaminación de los suelos adyacentes a los oleoductos, sino simplemente muestras puntuales geográficamente asociadas a ellos.

Por otro lado, es importante volver a destacar que únicamente podemos evaluar el estado de contaminación de los suelos adyacentes a estas instalaciones petroleras debido a que no se ha realizado ninguna colecta de muestras más periféricas que permita evaluar la contaminación en zonas alejadas de las infraestructuras. Consecuentemente, una de las preguntas importantes que nos resta por resolver es el gradiente de contaminación en suelos de la RNPS a partir de las infraestructuras petroleras y hasta las áreas que podamos considerar libres de contaminación, es decir, determinar el área impactada por la actividad petrolera.

5.5 ANÁLISIS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

El análisis mediante las técnicas de teledetección ha permitido identificar y cuantificar la superficie adyacente a la batería Yanayacu y a los oleoductos. Mediante el estudio de la variación del NDVI se ha observado que frecuentemente las mismas superficies que han mostrado un incremento negativo del NDVI entre dos imágenes consecutivas, presentan un incremento positivo entre las dos imágenes sucesivas. En la Figura 58 se observa cómo prácticamente toda la superficie que presenta un incremento positivo del NDVI ponderado entre las imágenes de 1986 y 1988 en los alrededores de la batería Yanayacu, había mostrado un incremento negativo entre 1985 y 1986.

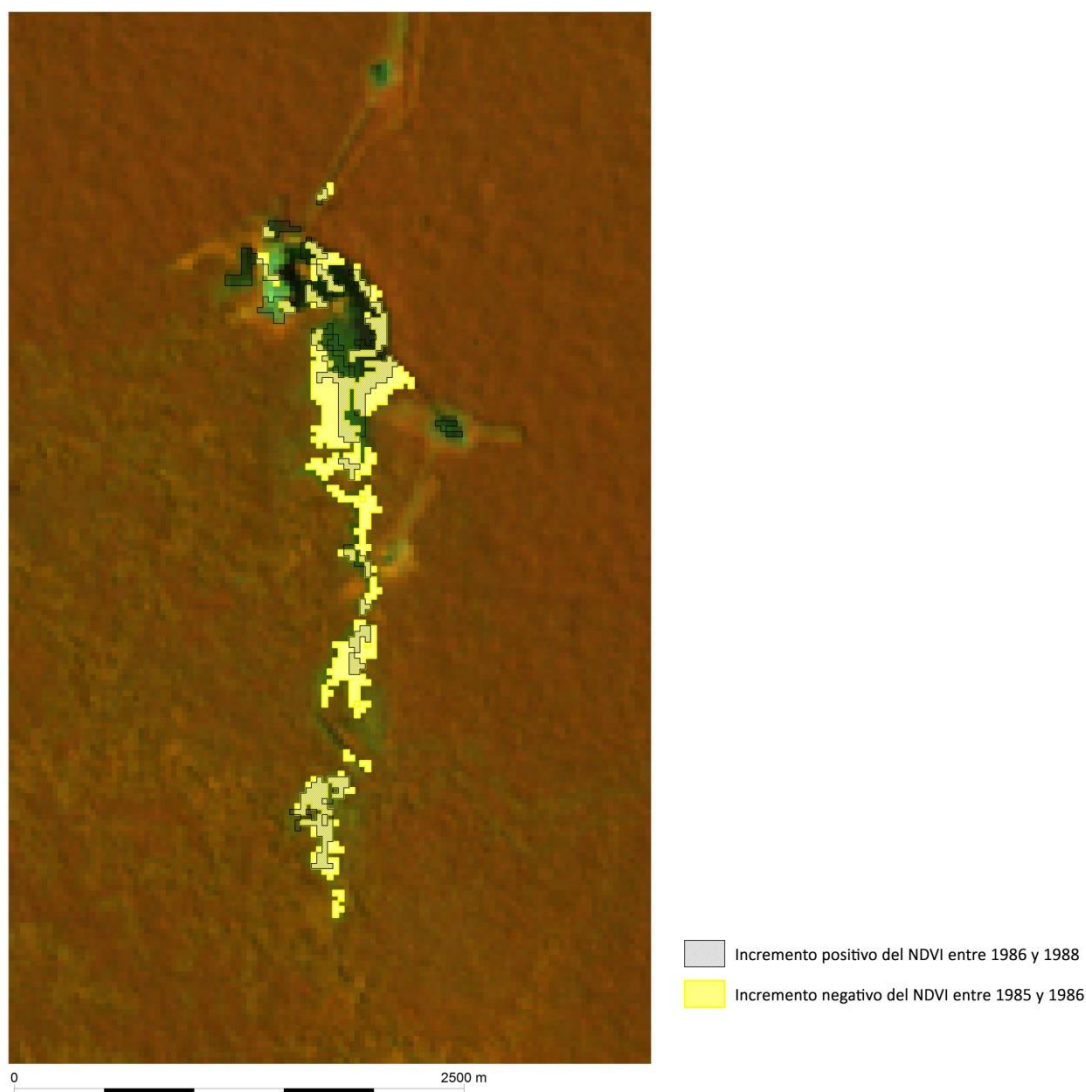


Figura 58. Superficie que presenta un incremento negativo del NDVI ponderado entre el 06/08/85 y el 09/08/86 y áreas con un incremento positivo del NDVI ponderado entre 09/08/86 y 03/01/88.

El estudio de la variación del NDVI refleja que: a) la respuesta espectral del bosque tropical es constante y homogénea; b) el incremento negativo del NDVI ponderado con el promedio del NDVI del conjunto de la zona indica que se ha producido algún tipo de alteración respecto a la fecha de la imagen anterior; c) la mayoría de zonas que presentan un incremento positivo del NDVI ponderado han sufrido algún tipo de alteración anteriormente; y d) 746.45 ha han presentado un incremento negativo en una o más ocasiones a lo largo de la serie temporal.

La alteración del bosque debido a la deforestación puede tener consecuencias tanto en la fauna como en la flora de la zona, debido a que se trata de ecosistemas frágiles en los que el efecto de margen es muy patente. Primack (2010) describe un efecto de margen de hasta 400 metros en los que se ven seriamente alteradas las condiciones del ecosistema, llegando a describir una elevada mortalidad de árboles en los primeros 300 metros.

Laurance *et al.* (2009) describe la apertura de una carretera como una barrera infranqueable para numerosas especies animales incluidas aves, mamíferos que nunca se aventuran a cruzar una zona abierta.

De acuerdo con Primack (2010), la superficie de bosque tropical afectada por una alta mortalidad de árboles debido al efecto de margen en el área de estudio que rodea la batería de Yanayacu y los oleoductos es de 8.116.24 ha, de la cuales 2.948.19 se sitúan en el interior de la RNPS (Figura 59).

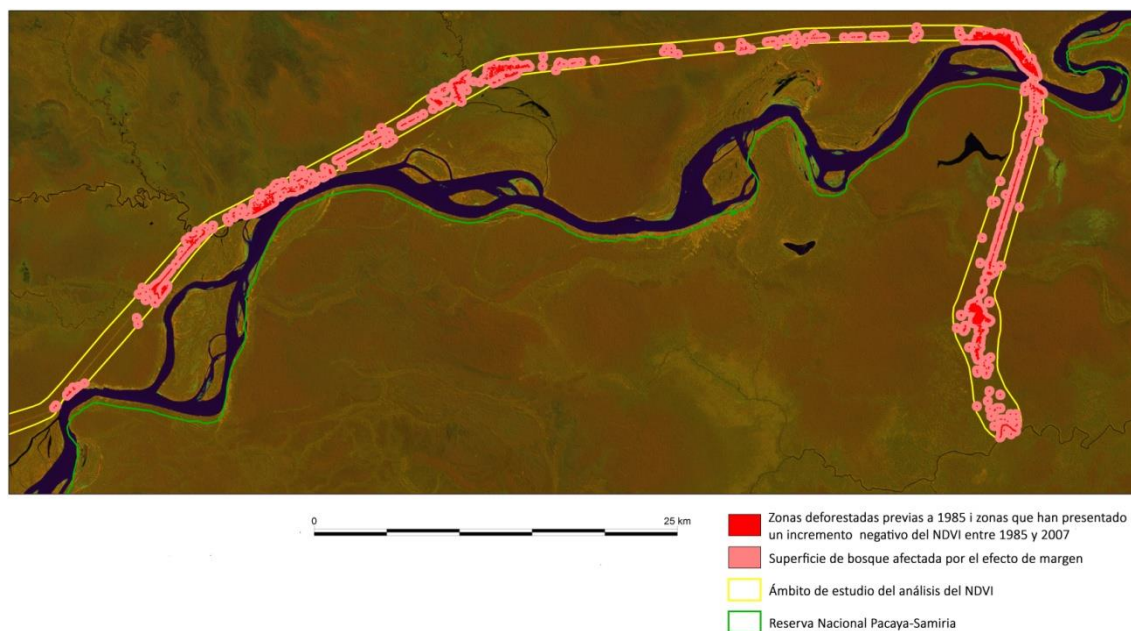


Figura 59. Superficie deforestada en la imagen del 6 de agosto de 1985 o que en una o más ocasiones ha presentado un incremento negativo del NDVI ponderado entre dos imágenes consecutivas de la serie temporal y superficie de bosque afectada por el efecto de margen.

A pesar de la resolución de 30 metros de las imágenes Landsat, los resultados del estudio de la variación del NDVI son satisfactorios y permiten detectar de forma precisa las zonas en las que se ha producido deforestación, bien sea total o parcial.

Por el contrario, los resultados a este nivel de resolución no permiten asegurar qué píxeles donde parte de la vegetación pudiera estar afectada por la contaminación quedarán necesariamente seleccionados.

Gracias a la fotointerpretación de la serie temporal de imágenes de la batería Yanayacu se ha observado cómo el agua de formación vertida directamente a la laguna adyacente a la batería fluía en dirección sur hacia la quebrada de Yanayacu Grande.

Entre los años 1985 y 1994, mientras la totalidad de las aguas de formación eran vertidas directamente a la laguna adyacente, la superficie cubierta por petróleo muestra un claro aumento con un promedio de 38.3 ± 23.8 ha de superficie cubierta por petróleo. Esta tendencia se invierte a partir del año 1994, en que se observa un máximo de superficie cubierta por petróleo (67.8 ha) y que coincide con la puesta en marcha de la tubería de descarga hacia la quebrada de Huistoyanayaquillo (año 1995).

Además, los resultados concuerdan con la actividad llevada a cabo por las compañías Petroperú y Pluspetrol Norte en la Batería 3 del Lote 8X.

Desde el comienzo de la actividad petrolera en la batería en el año 1970 hasta el año 1995 la totalidad de las aguas de formación procedentes de la actividad de la Batería 3 se vertían directamente a la laguna adyacente (PAC 2005). El drenaje de esta laguna principalmente se dirige hacia el sur, primero por una zona más o menos pantanosa que va estrechándose hasta formar una pequeña quebrada que lleva sus aguas hasta el río Yanayacu Grande (Puinamudt 2012).

En el año 1993 la evaluación ecológica de la RNPS elaborada por *The Nature Conservancy* y la UNALM identifican el impacto negativo de la batería en un área de 200 ha entre los ríos Huistoyanayacu y Yanayacu Grande (Puinamudt 2012).

A partir del 1995 se comienza a derivar el 25% de las aguas de producción a la quebrada de Huistoyanayaquillo mediante una tubería de descarga.

Desde el 1998, el agua de formación es conducida en dirección norte por un acueducto de 16,5 km de longitud para ser vertida directamente en el río Marañón.

Las clasificaciones mixtas son una buena herramienta para la identificación de zonas contaminadas cubiertas por petróleo y posibles vertidos a lo largo de los oleoductos. A pesar de ello en determinadas imágenes no es fácil discriminar entre las zonas cubiertas por petróleo y las zonas encharcadas de los terrenos pantanosos. Esta dificultad adquiere mayores dimensiones en la RNPS por formar parte de una llanura inundable. Es importante por lo tanto hacer uso de imágenes de satélite correspondientes a la temporada de vaciante para minimizar dichas dificultades.

Las prospecciones sísmicas llevadas a cabo en la RNPS no se han podido identificar mediante técnicas de teledetección debido a que datan de la década anterior a la imagen de satélite más antigua de la que se dispone. Pese a ello, la estimación realizada a partir del estudio realizado en el Lote 1AB (Muñoa *et al.* 2015) es de 800 ha deforestadas y casi 35.000 afectadas por el efecto de margen.

6. CONCLUSIONES

Este estudio pretende entender el impacto causado las actividades petroleras en la RNPS. Con este fin se han recopilado 565 muestras ambientales de distintos reportes públicos y privados, se compararon sus valores con los límites legales vigentes, y se determinó los factores estadísticamente influyentes que explican su varianza y la distribución de la contaminación mediante sistemas de información geográfica. Paralelamente se identificó y cuantificó las áreas deforestadas, la mortalidad arbórea y la disminución de la producción primaria causadas por la actividad petrolera entre los años 1984 y 2015 como indicadores de estrés de la vegetación por contaminación petrogénica.

En relación al agua, los resultados demuestran que existe contaminación por diversos compuestos que sobrepasan los límites legales vigentes, incluso durante el período más reciente entre 2008 y 2015. Para este último periodo, el 30.3% de concentraciones de plomo superan los LPM en agua, el 1.6% de arsénico, el 6.6% de níquel y el 0.8% de cadmio. También hay evidencias de contaminación por TPHs, aceites y grasas pese a no estar regulados en la normativa aplicable, como se ha observado al comparar los valores con otras normativas nacionales e internacionales. Todos estos porcentajes aumentan si se considera todo el periodo de estudio desde 1994 hasta 2015.

Aunque el mercurio no alcanza niveles detectables de contaminación en el 95% de muestras de aguas, estos límites de detección superan el límite legal de mercurio en la mayoría de los casos, e incluso en análisis realizados recientemente. Siendo el mercurio un metal de gran importancia como indicador de actividades extractivas como la actividad hidrocarburífera, aurífera y maderera, nos sorprende esta deficiencia. Dicha problemática se repite con los LDs para plomo, cadmio y HAPs de importante relevancia por su conocido efecto carcinogénico para humanos (e.g., benzo(a)pireno).

Al estudiar los factores que influyen en el incremento de las concentraciones en muestras de agua de los diferentes compuestos químicos analizados, se observa que el factor que más influyente ha sido el año de análisis. El periodo anterior al año 2008, año en que se inicia la reinyección de vertidos en los yacimientos, se observan mayores concentraciones de bario, cloruros, aceites y grasas, fenoles, sulfuros, plomo y cromo. Sin embargo, y tal como hemos mencionado anteriormente también se observan indicios contaminación petrogénica durante el período más reciente entre 2008 y 2015. En su conjunto, este resultado permite establecer la relación de dichos compuestos con la actividad hidrocarburífera en la RNPS.

La posición de las instalaciones petroleras también ha sido un factor relevante en el análisis estadístico. Se han observado mayores concentraciones de indicadores petrogénicos (grasas, conductividad, cromo total, cromo hexavalente, fenoles, y especialmente en cloruros) en muestras colectadas aguas abajo respecto a la instalación en comparación con las muestras colectadas después de éstas. Esto indica inequívocamente que la diferencia de concentraciones entre ambos puntos es debida a los compuestos químicos que tanto batería como oleoducto están aportando al agua. De hecho, la distribución espacial de la contaminación nos muestra claramente que ésta se concentra en las aguas próximas a la batería nº3 y a los antiguos puntos

de vertido en la quebrada Huistoyanayaquillo y en el río Marañón. Por lo tanto, podemos afirmar que el aporte de contaminantes ha sido significativo, y que éste se ha distribuido a lo largo de los cursos de agua.

Los datos disponibles en muestras de suelos provienen principalmente del periodo reciente 2013-2105. Sorprende la escasez de información colectada en períodos anteriores, especialmente antes del 2008 cuando las prácticas de manejo de residuos procedentes de la actividad petrolera eran más contaminantes. Se observa un elevado porcentaje de muestras que superan el LPM vigente para suelos (51% de TPHs de C10-C28, 28% de TPHs de C28-C40 carbonos y 18.4% de bario y el 13.2 % de plomo). Aunque el análisis realizado de TPHs está asociado a derrames localizados, el análisis de los metales pesados formó parte del sistema de monitoreo regular de las actividades petroleras. Este hecho nos indica que las elevadas concentraciones de los indicadores petrogénicos corresponden a momentos puntuales (derrames) y a muestras aleatoriamente distribuidas en el tiempo y no asociadas a vertidos regulares de aguas de formación (monitoreo). La presencia de elevadas concentraciones de metales pesados indicadores de actividad petrogénica (plomo, cadmio, arsénico y bario) nos permite afirmar que en las inmediaciones de las infraestructuras petroleras (batería y oleoducto) de la RNPS existen evidencias de contaminación petrogénica. Los mapas de suelos demuestran que las zonas más contaminadas son las inmediaciones de la batería nº 3, la zona junto del oleoducto al río Marañón y las zonas del oleoducto Norperuano, en las que se ha reportado en diversas ocasiones derrames de crudo. Los indicadores de contaminación petrogénicos más importantes (bario, cadmio, plomo, cromo y TPHs) muestran mayores concentraciones en zonas cercanas a las fuentes de contaminación, observándose un efecto dilución/dispersión a medida que se aleja el punto de colecta del punto de vertido. En este sentido la distancia a la fuente contaminante (batería y oleoducto) ha sido estadísticamente el factor de mayor influencia en la variación de concentraciones de los indicadores en muestras de suelo. Las concentraciones más elevadas de los contaminantes se dan a distancias que no pasan de 400 m en la mayor parte de los indicadores directamente relacionados con la actividad hidrocarburífera.

Este estudio nos permite entender que, aunque ha habido un esfuerzo para estudiar el nivel de contaminación ambiental en la RNPS, éste esfuerzo no ha sido coordinado y no se ha establecido un sistema de colecta unificado y sistemático. Se observa una distribución irregular de colecta de muestras tanto en el tiempo (años y estacionalidad) como en la distribución espacial, y una deficiente selección de análisis de indicadores donde frecuentemente se analizan compuestos químicos intrascendentes como indicadores petrogénicos y se obvian otros indicadores claramente relacionados con la actividad hidrocarburífera. A pesar de que este condicionante ha tenido influencia negativa en los resultados de nuestro estudio, se ha podido demostrar evidencias de contaminación relacionadas con las actividades petroleras, incluso después del inicio de la reinyección de las aguas producidas en los yacimientos. No obstante, es importante destacar que una colecta sistematizada de muestras nos permitiría entender mejor el gradiente de contaminación en la RNPS a partir de las infraestructuras petroleras y hasta áreas que podamos considerar libres de contaminación, es decir, determinar el área impactada por la actividad petrolera. En este sentido, además de sistematizar la colecta de muestras ambientales,

recomendamos realizar un estudio sobre la composición del crudo y de las aguas producidas, un estudio sobre la calidad de agua de los pozos subterráneos y manantiales cercanos al punto de reinyección de vertidos, y un estudio en concreto sobre la composición isotópica del plomo para mejorar la comprensión global del nivel de contaminación ambiental en la RNPS.

El análisis mediante técnicas de teledetección se han observado impactos causados por las operaciones petroleras a nivel de disminución de la productividad primaria, aumento de mortalidad arbórea y de la deforestación y presencia de petróleo cubriendo amplias áreas. La superficie total afectada por la disminución de la productividad primaria es de 746.45 ha dentro del área adyacente a la batería Yanayacu y a los oleoductos. En este área de estudio estimamos que la superficie de bosque afectada por la alta mortalidad de árboles debido al efecto de margen en el área de estudio es de 8.116.24 ha, de la cuales 2.948.19 (36.6%) se sitúan en el interior de la RNPS. Entre los años 1985 y 1994, cuando las aguas de formación eran vertidas directamente a la laguna adyacente, 38.3 ha de la zona estaban en promedio cubiertas directamente por petróleo, llegando a un máximo de 67.8 ha en el año 1994. Sin embargo, a partir del año 1995, cuando se inicia a verter en la quebrada de Huistoyanayaquillo se observa la disminución de esta superficie. Finalmente, se estima que impacto que las prospecciones sísmicas han causado en la RNPS en los años 1970s es de 800 ha deforestadas y casi 35.000 ha afectadas por el efecto de margen.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen con mucho agradecimiento la ayuda ofrecida por la organización Derecho, Ambiente y Recursos Naturales del Perú, sin la cual este trabajo no hubiera sido posible. Muchas gracias a Lucila Rozas Urrunaga, Pool Erazo y Cristina López por su ayuda en la recopilación de los datos necesarios para este estudio.

8. REFERENCIAS

1. Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades-ATSDR. 2008. *Toxic Facts Profiles*. Atlanta, US.
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles>
2. Barwise A.J.G. 1990. *Role of nickel and vanadium in petroleum classification*. Energy fuels 4(6), pp647-652.
3. Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. 1985. *Classification and Regression Trees*. European Journal Of Operational Research 19, 144.
4. Brogan J., Crowe M., Carty G., 2001. *Developing a national Phosphorus balance for agriculture in Ireland*. Ireland Enviromental Protection agency. Wexford, Ireland.
5. Bodmer, R., T. G. Fang, P. Puertas, M. Antúnez, K. Chota y W. Bodmer. 2014. *Cambio Climático y Fauna Silvestre en la Amazonía Peruana: Impacto de la Sequía e Inundaciones Intensas en la Reserva Nacional Pacaya Samiria*. FundAmazonia/Sernanp, Lima, Peru
6. Butt, N., Beyer, HL., Bennett, JR., Biggs, D., Maggini, R., Mills, M., Renwick, AR., Seabrook, LM & Possingham, HP., 2013. *Biodiversity Risks from Fossil Fuel Extraction*. Science 342, 425–426.
7. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006. *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*. <http://sts.ccme.ca/en/index.html?chems=all&chapters=2>
8. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001. *Canadian Water Quality environemntal for the protection of aquatic life*. <http://sts.ccme.ca/en/index.html?chems=all&chapters=1>
9. Council of the European Union, 1998. *Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption*. European Union. Brussels, Belgium, 1998. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:31998L0083>
10. Gobierno del Perú, 1982. Decreto Supremo Nº 016-82-AG del 4 de Febrero de 1982. Órgano legislativo del gobierno del Perú. Lima, Perú.
11. Dirección de hidrografía y navegación, 2006. *Conceptos de hidráulica fluvial de los ríos de la Amazonía*. Lima, Perú.
12. U.S. Environmental Protection Agency, 1997. *Environmental Protection Agency/non-detection policy for contracted laboratories*. <http://www.epa.gov/region02/water/dredge/nondetect.htm>
13. Fakhru'l-Razi, A.; Pendashteh, A.; Abdullah, L. C.; Biak, D. R. A.; Madaeni, S. S.; Abidin, Z. Z. 2009. *Review of technologies for oil and gas produced water treatment*. Journal of Hazardous . Materials, 170, 530–551
14. Finer, M. & Orta-Martínez, M., 2010. *A second hydrocarbon boom threatens the Peruvian Amazon: trends, projections, and policy implications*. Environmental Research Letters 5, 14012.
15. Finer, M., Babbitt, B., Novoa, S., Ferrarese, F., Pappalardo, S., De Marchi, M., Saucedo, M., Jumar, A. 2015. *Future of oil and gas development in the western Amazon*. Environmental Research Letters 10, 024003
16. Finner, M., Jenkins, C.N., Powers. B. 2013. *Potential of best practice to reduce impacts from oil and gas projects in the Amazon*. Plos One 8(4):e63022

17. G.Reáteghi-Zirena E., M. Stewart P., Whatley A., Chu-Koo F., E. Sotero-Solis V., Merino-Zegarra C., Vela-Paima E. 2014. *Microtox® acute toxicity testing of Peruvian crude an oil-contaminated water and sediment*. Environmental Monitoring Assessment.186, 2171-2184
18. Horbe, A. M. C.; Ana, G.; Santos, S. 2009. *Chemical Composition of Black-Watered Rivers in the Western Amazon Region*. Journal of the Brazilian Chemical Society, 20, 1119–1126.
19. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana-IIAP, 1994. *Evaluación de la capacidad de tierras y de os recursos naturales de la Reserva Nacional Pacaya Samiria*. Informe final, Iquitos, Perú, 248 p.
20. Instituto Nacional de Recursos Naturales-INRENA, 2009-2013. *Plan maestro para la conservación de la biodiversidad biológica y el desarrollo sostenible de la Reserva Natural Pacaya Samiria y su zona de amortiguamiento*. Iquitos, Perú, 136 p.
21. Jambor, J.L. 2002. *New mineral names*.American Mineralogist 87: 181.
22. Küchler, I. L.; Miekeley, N.; Forsberg, B. R. 2000. *A Contribution to the Chemical Characterization of Rivers in the Rio Negro Basin*. Journal of the Brazilian Chemical Society, 11, p286–292.
23. Lubin, J. H.; Colt, J. S.; Camann, D.; Davis, S.; Cerhan, J. R.; Severson, R. K.; Bernstein, L.& Hartge, P. 2004. Epidemiologic Evaluation of Measurement Data in the Presence of Detection Limits. *Environmental. Health Perspectives*, 112, 1691–1696.
24. McFeeters, SK. 1996. *The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of water open features*. International journal of remote sensing. 17: 1425-1432.
25. Ministerio de Energía y Minas-MINEM, 2006. *Acta de Dorissa*. Ministerio de Energía y Minas. Feconaco. Pluspetrol Norte S.A. Dorissa, Perú.
26. Ministerio del ambiente, 2008. *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua*. Decreto Supremo N°002 -2008 ECA - Agua. Lima, Perú.
27. Ministerio del ambiente, 2013a. *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para suelos*. Decreto Supremo N°002 -2013 ECA - Suelo –MINAM. Lima, Perú.
28. Ministerio del Ambiente. 2013b. *Resolución Ministerial N° 094-2013-MINAM*. Lima, Perú.
29. Ministerio del Ambiente. 2013c. *Resolución Ministerial N° 263-2013-MINAM*. Lima, Perú.
30. Ministerio del Ambiente. 2013d. *Resolución Ministerial N° 370-2013-MINAM*. Lima, Perú.
31. Ministerio del Ambiente. 2014a. *Resolución Ministerial N° 136-2013-MINAM*. Lima, Perú.
32. Ministerio del Ambiente. 2014b. *Decreto Supremo N° 006-2014-SA*. Lima, Perú.
33. Neff, J. M. 2002. *Bioaccumulation in Marine Organisms. Effect of Contaminants from Oil Well Produced Water*; Elsevier Ltd: Oxford, U.K. pp 5.
34. Organization of Petroleum exporting Countries-OPEC, 2015. *Monthly oil market report July 2015*. Petroleum studies department. Vienna, Austria.
35. Pluspetrol Norte S.A. 2005. *Plan Ambiental Complementario de Lote 8*. Elaborado por Seacrest Group Perú. Lima, Perú
36. Pons, X. & Solé-Sugrañes, L. 1994. *A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data*. Remote Sensing of Environment, 48:191-204.
37. Pons, X. 2004. *MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció*. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF). Bellaterra. ISBN: 84-931323-4-9.
38. Powers B. 2008.*Informe sobre los avances en los proyectos de reinyección de los Lotes 1AB y 8*. E-Tech International. New México, U.S.
39. Reynolds J. G. 2004. *Removal of nickel and vanadium from heavy crude oils by exchange reactions*. American Chemical Society. 49 (1) 80.

40. R Development Core Team. 2015. *Website for R software download*: <https://www.r-project.org/contributors.html>
41. Rouse J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. 1973. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium*. NASA SP-351, 1:309-317.
42. Therneau T., Atkinson B., Ripley B. 2013. *Package "rpart": Recursive partitioning and regression trees*.
43. Tibbetts P.J.C., Buchanan I.T., Gawel L.J., Large R. 1992. *A comprehensive determination of produced water: Technological/Environmental Issues and Solutions*. Plenum Publishing Corp., New York, pp97-113.
44. U.S. Environmental Protection Agency. 1978. *Environmental Health Effects Research Series. Iron*. Office of research and development. North Carolina, U.S. p10
45. U.S. Environmental Protection Agency. 2007. *TEACH chemical summary for Manganese*. Office of research and development. North Carolina, U.S.
46. Webb, J., Coomes, O., Mainville, N., Mergler, D. 2015. *Mercury contamination in an indicator fish species from andean amazonian rivers affected by petroleum extraction. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 285, 95:279
47. World Bank, 2015. *The great Plunge in Oil Prices: Causes, Consequences and Policy Responses*, Washington, USA, 61 p.