



Proyecto: “Fortalecimiento de capacidades I+P+P (Innovación+Promoción+Pago)
para restaurar suelos degradados en la región oeste del Canal de Panamá.

Principios físicos de las Técnicas nucleares e isotópicas y su aplicación en la evaluación de procesos de degradación del suelo y los recursos hídricos.

Casos de estudio real sobre su aplicación.

Dr.C. José Luis Peralta Vital

21-25 Abril 2025



En el último decenio se publican varios **marcos de Políticas mundiales importantes** (FAO, 2021; ONU, 2022)

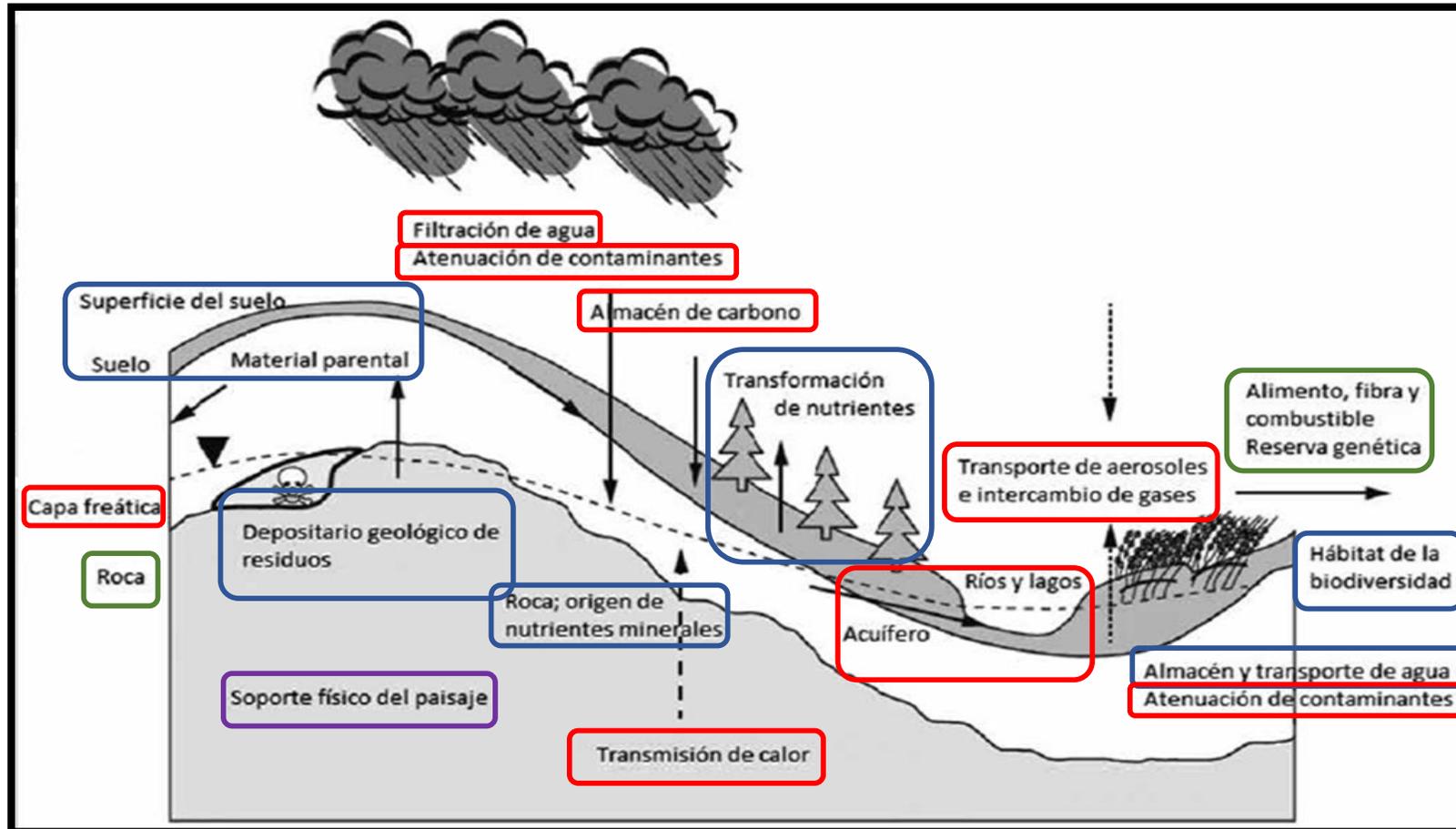
(Modificado de Banwart *et al* 2014)

- Agenda 2030 para Desarrollo Sostenible (ODS).
- Acuerdo de París sobre el cambio climático.
- Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.
- Modalidades de acción acelerada para pequeños Estados insulares.
- Agenda Urbana y Agenda Acción Addis Abeba.
- Tercera Conferencia Internacional sobre la Financiación para el Desarrollo.

ODS y la neutralidad de la degradación de las tierras.

ODS sobre el agua, metas a la tierra y la salud del suelo, evaluaciones mundiales de recursos naturales (suelos, actividad forestal, biodiversidad, desertificación y clima.

Nueva visión mundial “Una sola Salud”, expone al “SUELO” como compartimiento ambiental **proveedor** de todos **Servicios Ecosistémicos** ((Bouma, 2022 y FAO, 2023).



- Servicios de Soporte
- Servicios de Regulación
- Servicios de Abastecimiento/Suministro
- Servicios Culturales

Millennium Ecosystem Assessment, 2005

TÉCNICAS TRADICIONALES

Ecuaciones Universales (perdida suelo)

USLE
MUSLE
RUSLE

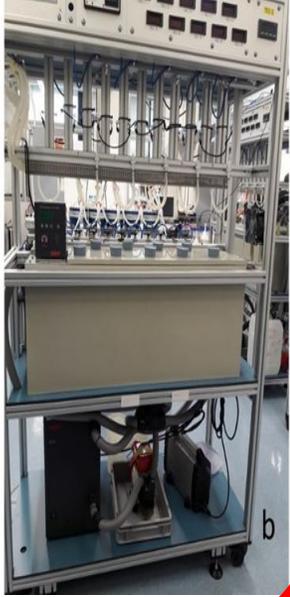


TÉCNICAS NUCLEARES

HIDROLOGÍA ISOTÓPICA



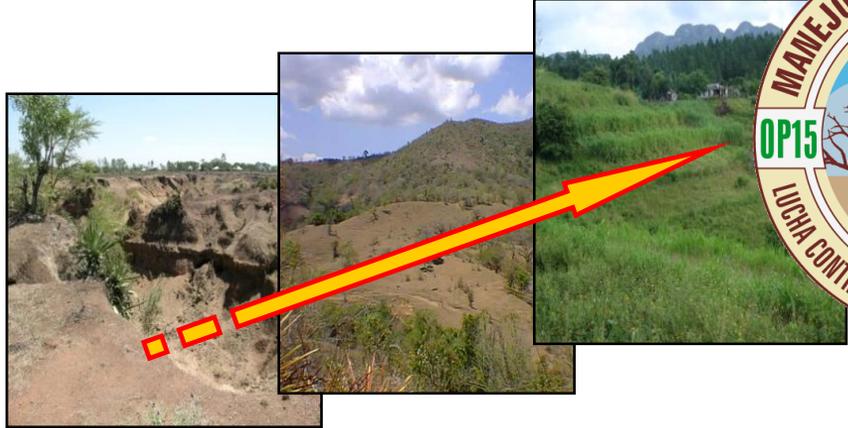
FRN



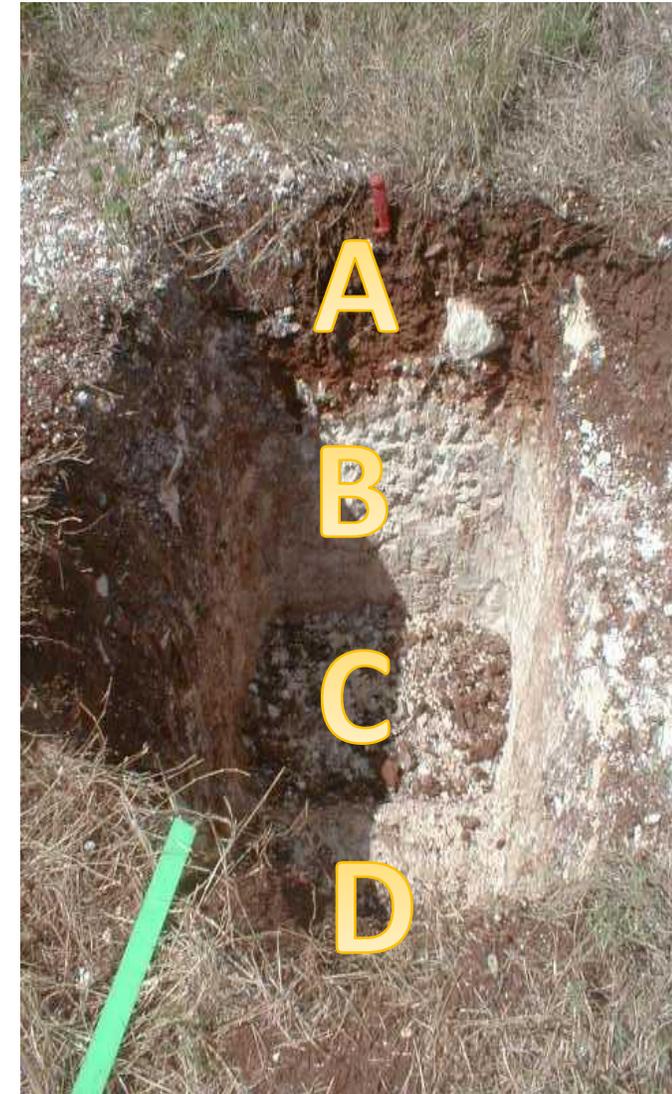
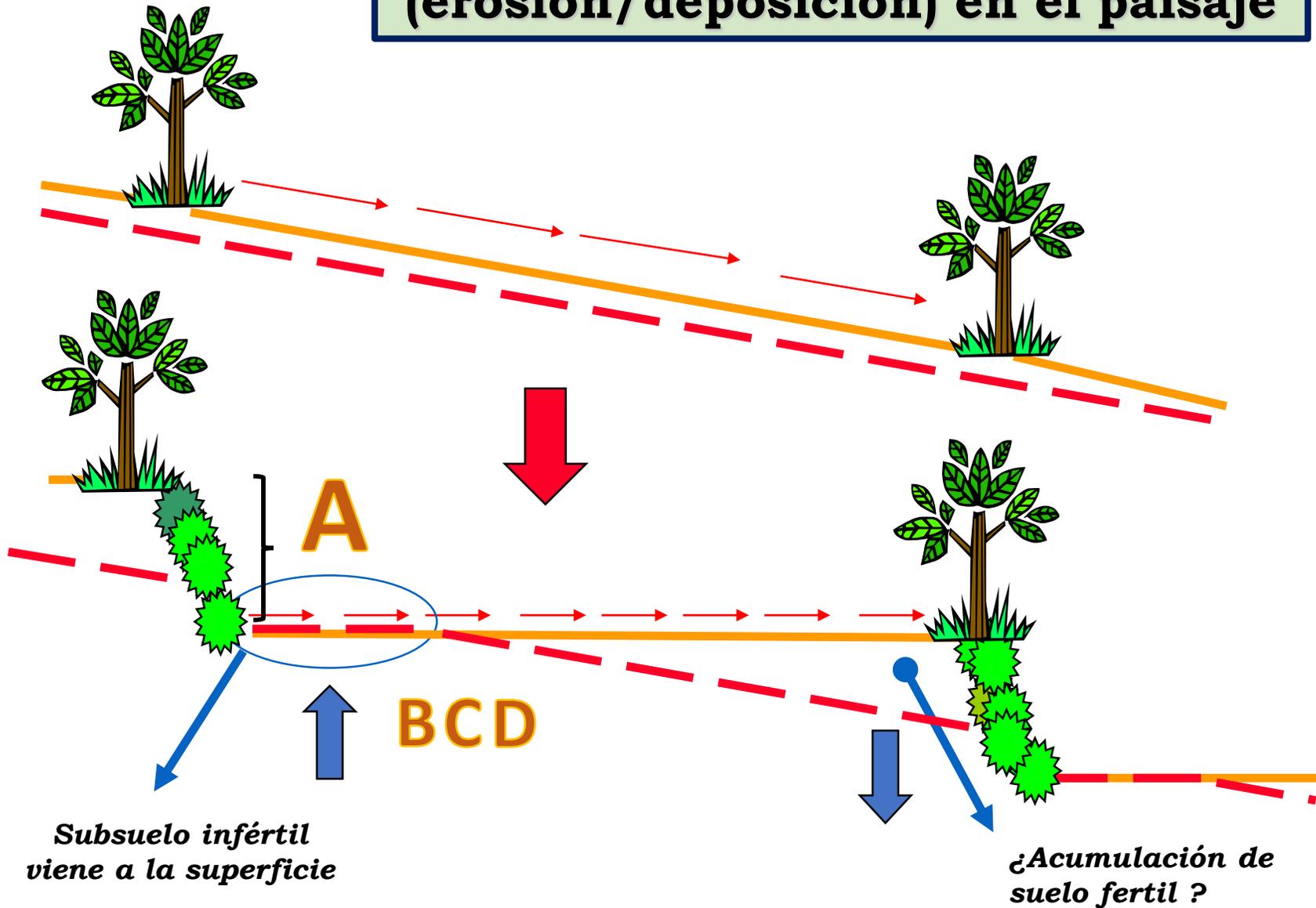
Vs



FINGERPRINT



Variabilidad espacial (erosión/deposición) en el paisaje



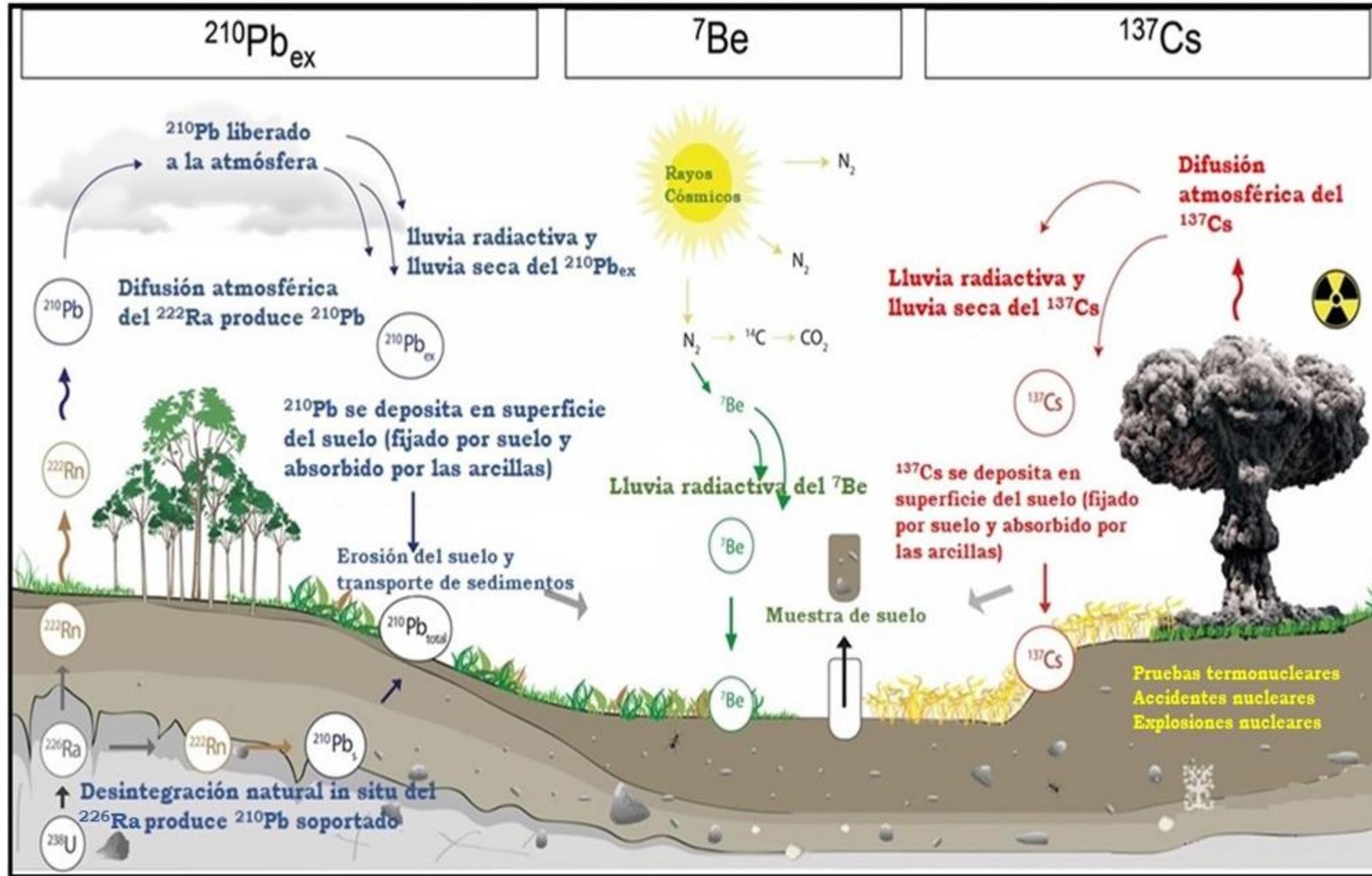
Fallout Radionuclides (FRN)

(RADIONUCLEIDOS CAIDOS CON LA LLUVIA)

(^{137}Cs ; ^7Be ; $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)

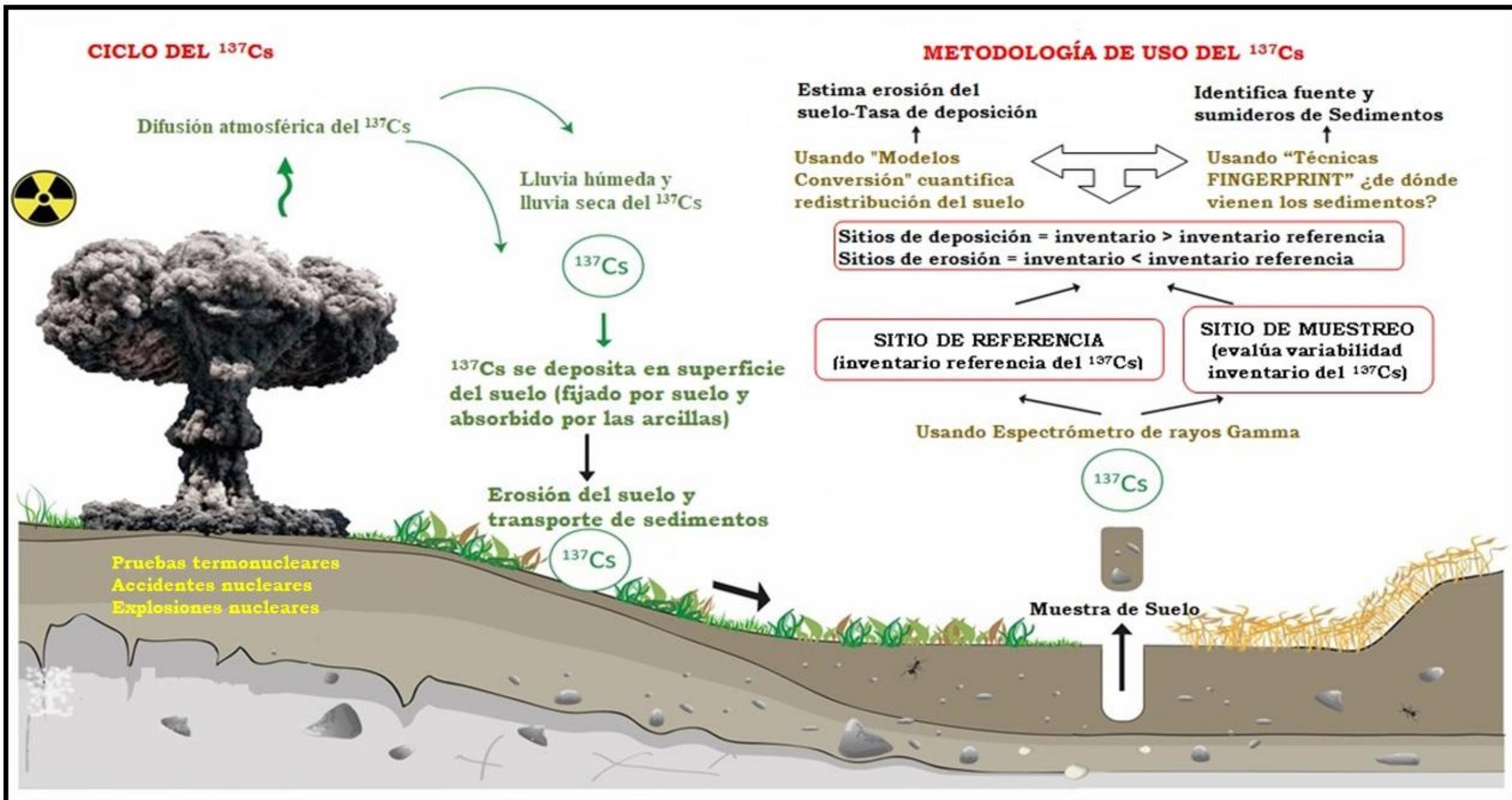


Origen de los radionucleidos $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$; ^7Be ; ^{137}Cs (FRN)



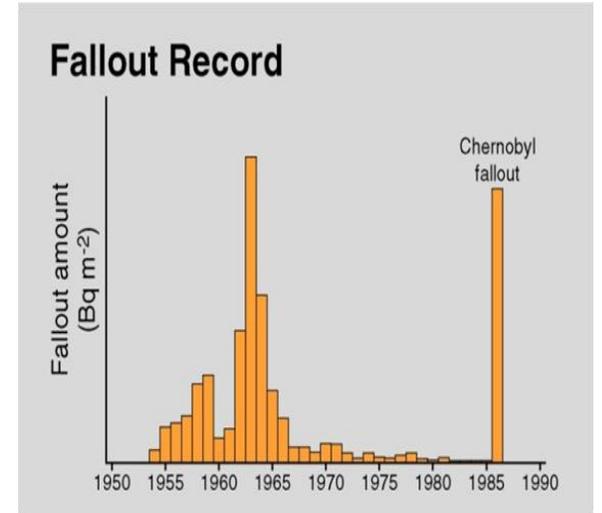
Nucleido	Origen	Vida-media	γ -Energía
^{137}Cs	Artificial	30 años	661 keV
^7Be	Natural	53 días	477 keV
^{210}Pb	Natural	22 años	46 keV

Ciclo del ^{137}Cs (estimación tasas de redistribución del suelo)

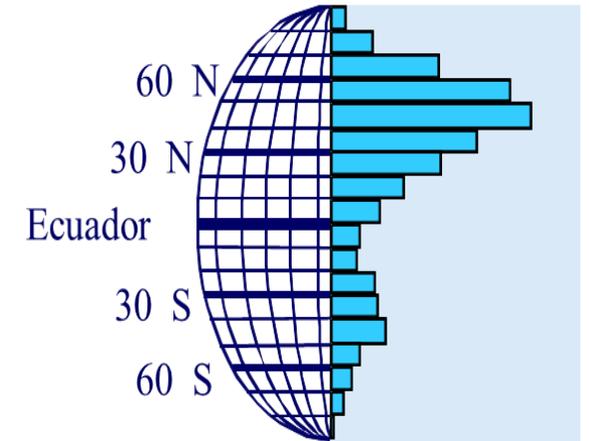


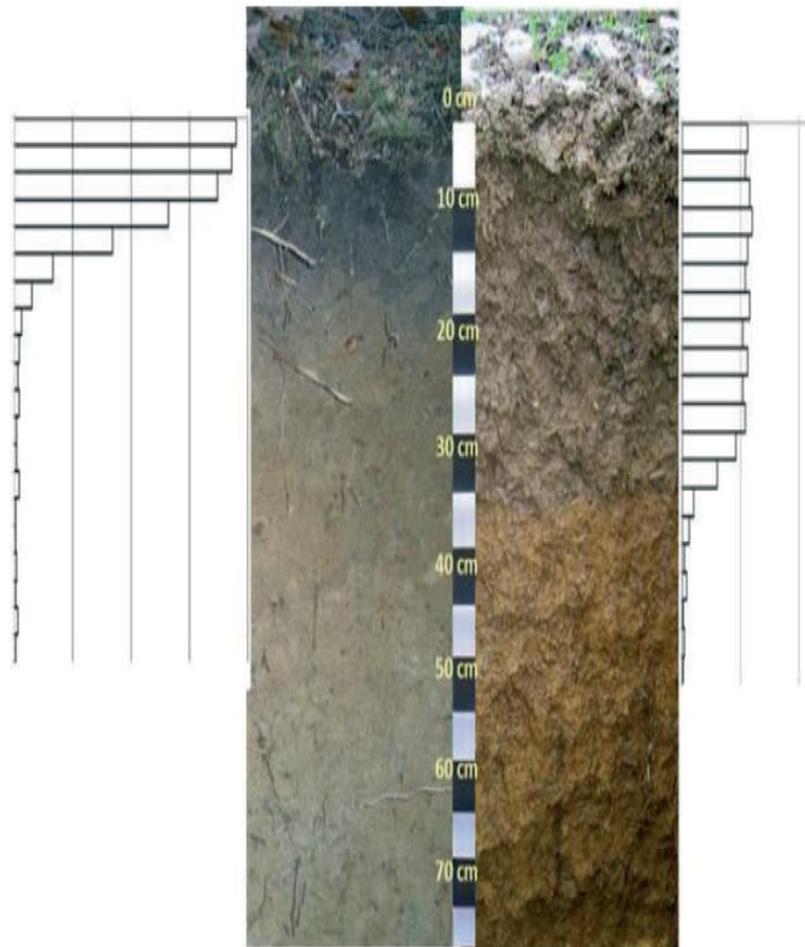


Accidente Planta Nuclear
CHERNOBIL (abril 1986)

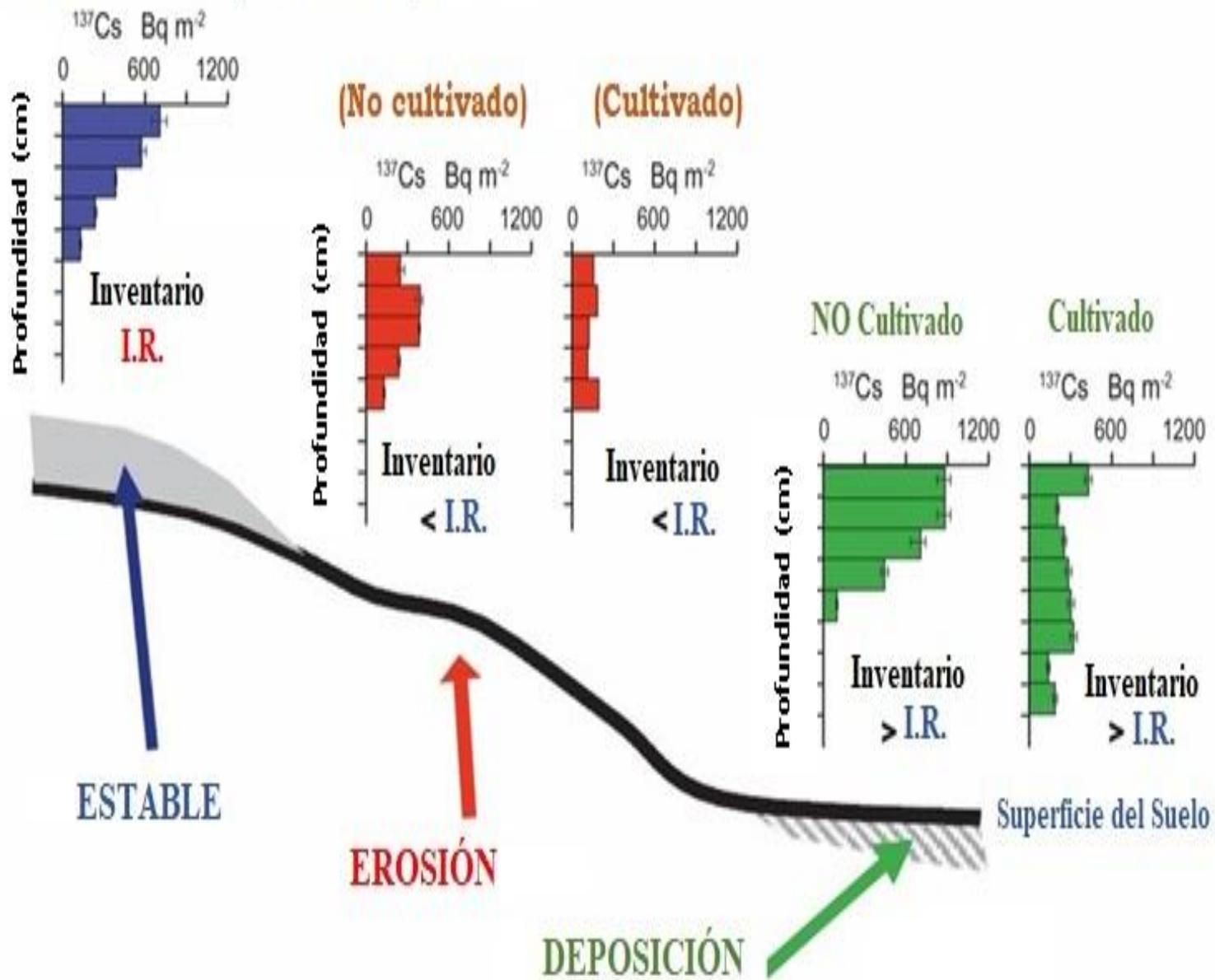


Accidente Planta Nuclear
FUKUSHIMA (marzo 2011)



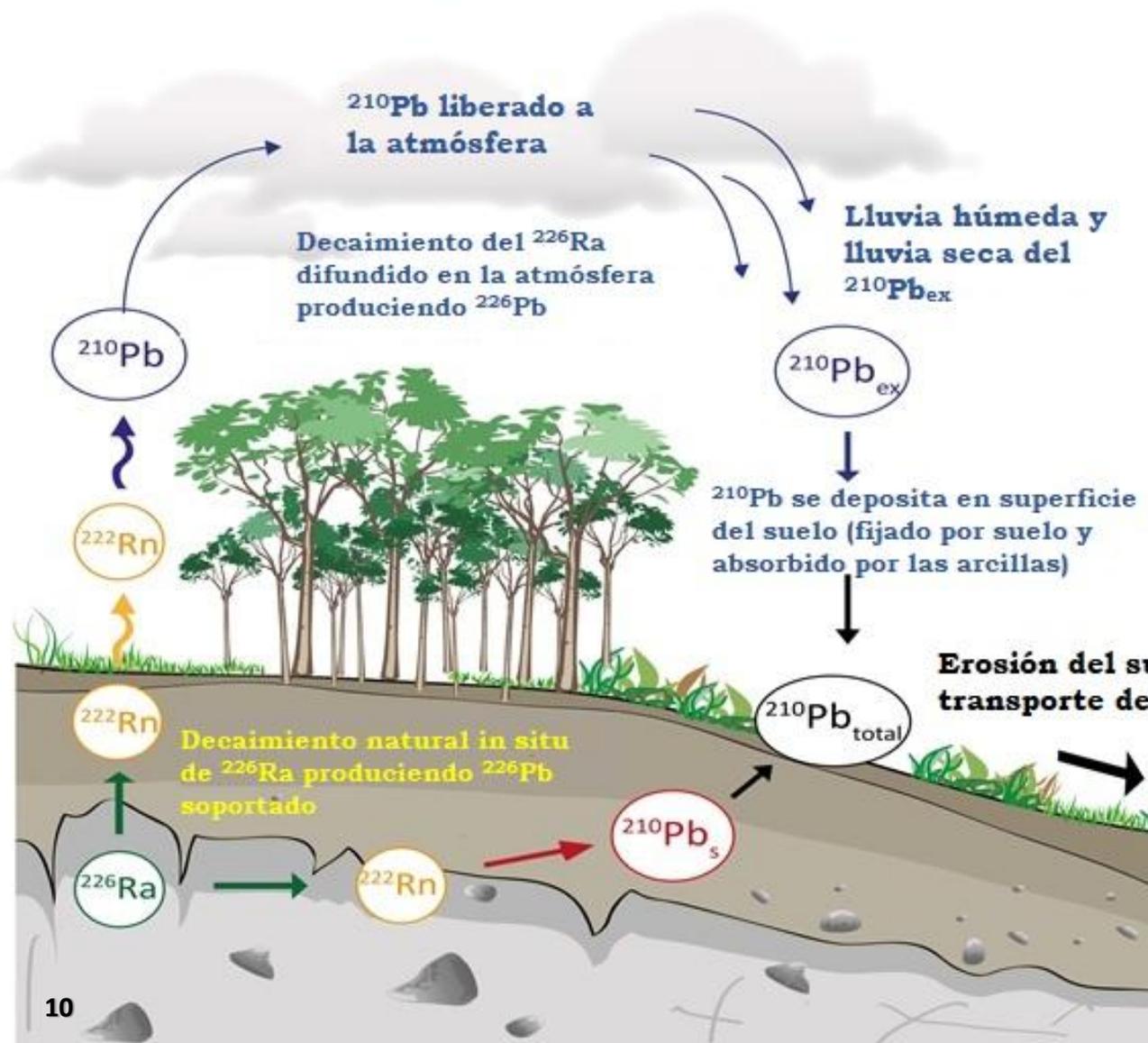


Perfil de Referencia (No cultivado)



Ciclo del $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (estimación tasas de redistribución del suelo)

CICLO DEL $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$



METODOLOGÍA DE USO DEL ^{210}Pb

Estimar erosión del suelo y Tasas de deposición

Identifica fuente y sumideros de Sedimentos

Usando modelos de Conversión

Usando "Técnicas FINGERPRINT"

COMPARACIÓN DE INVENTARIOS

Sitios de deposición = inventario > inventario referencia
 Sitios de erosión = inventario < inventario referencia

SITIO DE REFERENCIA (inventario referencia del ^{210}Pb)

SITIO DE MUESTREO (evalúa variabilidad inventario del $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)

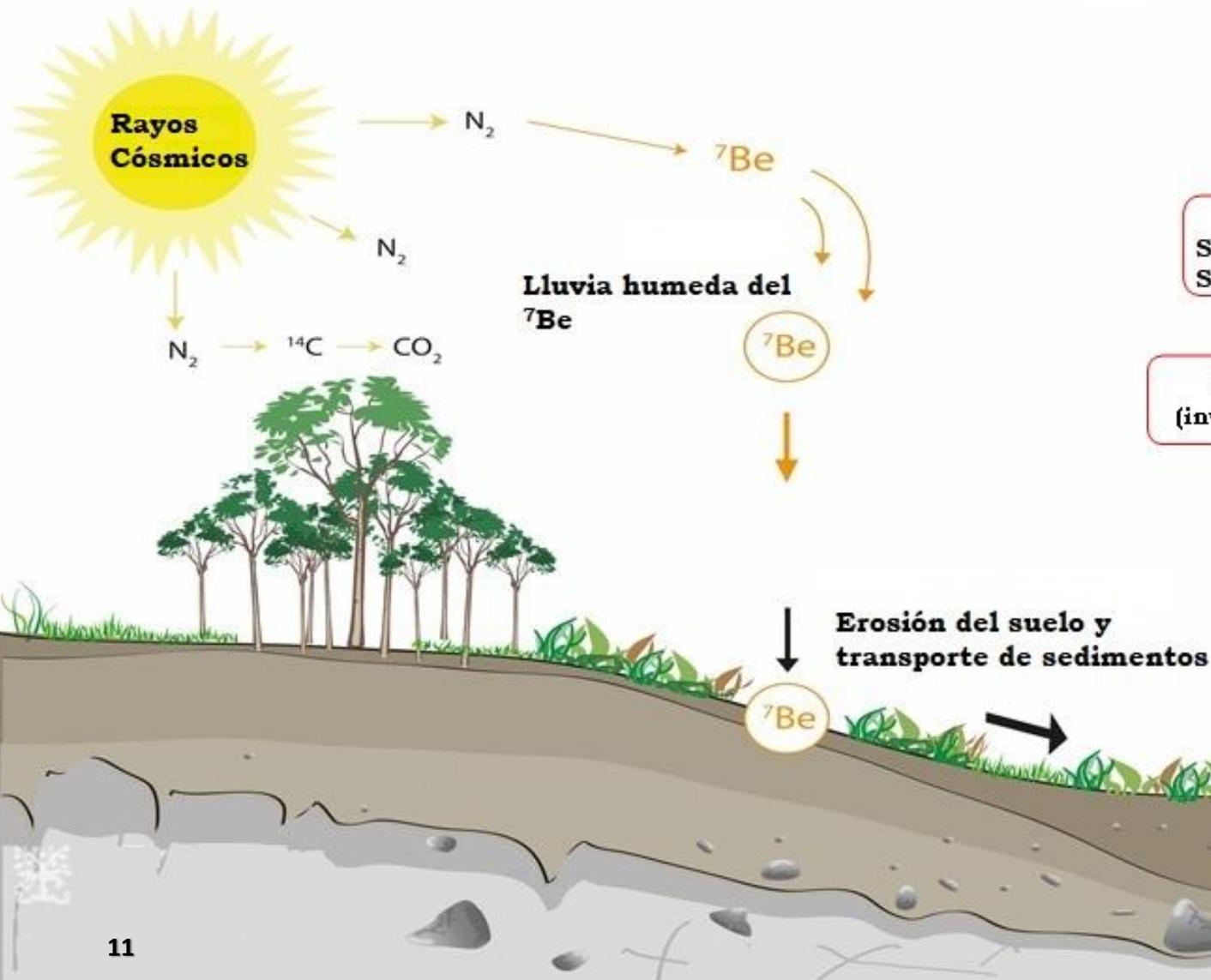
Usando Espectrómetro de rayos Gamma

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{210}\text{Pb}_s + ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$$

Muestra de Suelo

Ciclo del ^7Be (estimación tasas de redistribución del suelo)

CICLO DEL ^7Be



METODOLOGÍA DEL ^7Be

Estimar erosión del suelo y Tasas de deposición

Usando modelos de Conversión (cuantifica la redistribución del suelo)

COMPARACIÓN DE INVENTARIOS

Sitios de deposición = inventario > inventario referencia
Sitios de erosión = inventario < inventario referencia

SITIO DE REFERENCIA (inventario referencia del ^7Be)

SITIO DE MUESTREO (evalúa variabilidad inventario del ^7Be)

Usando Espectrómetro de rayos Gamma

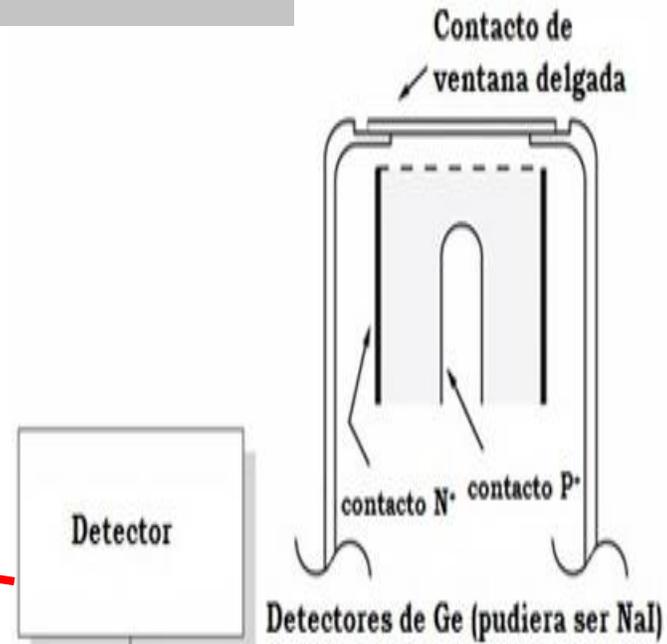
^7Be

Muestra de Suelo

Espectrómetro de rayos gamma

A- Equipo de espectrometría de rayos gamma .

B- Detectores coaxiales de Germanio hiperpuro (bajo fondo y alta resolución) y un detector de baja energía.



Análisis espectro métrico de rayos Gamma:

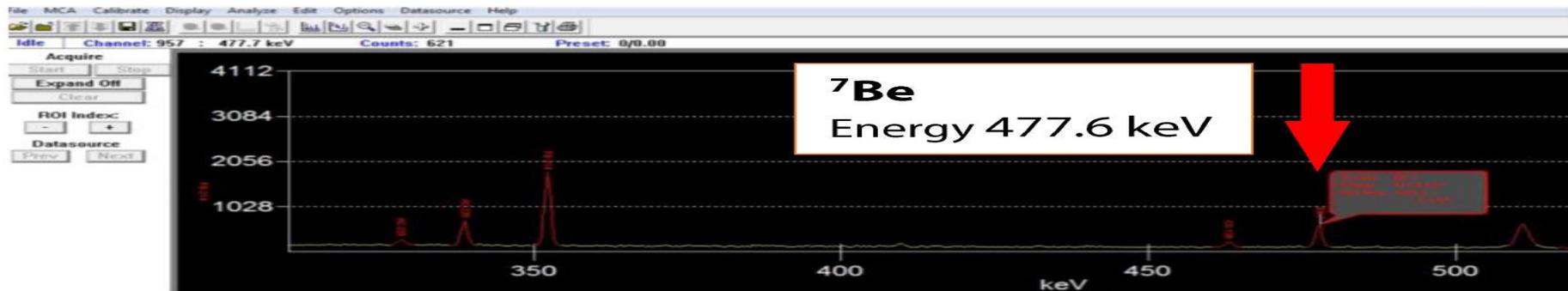
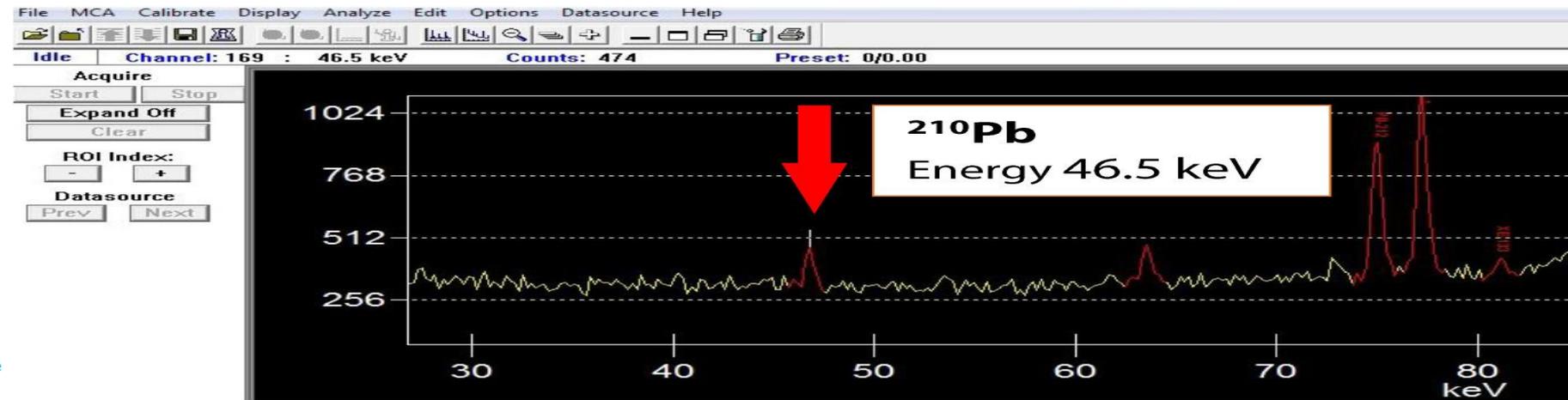
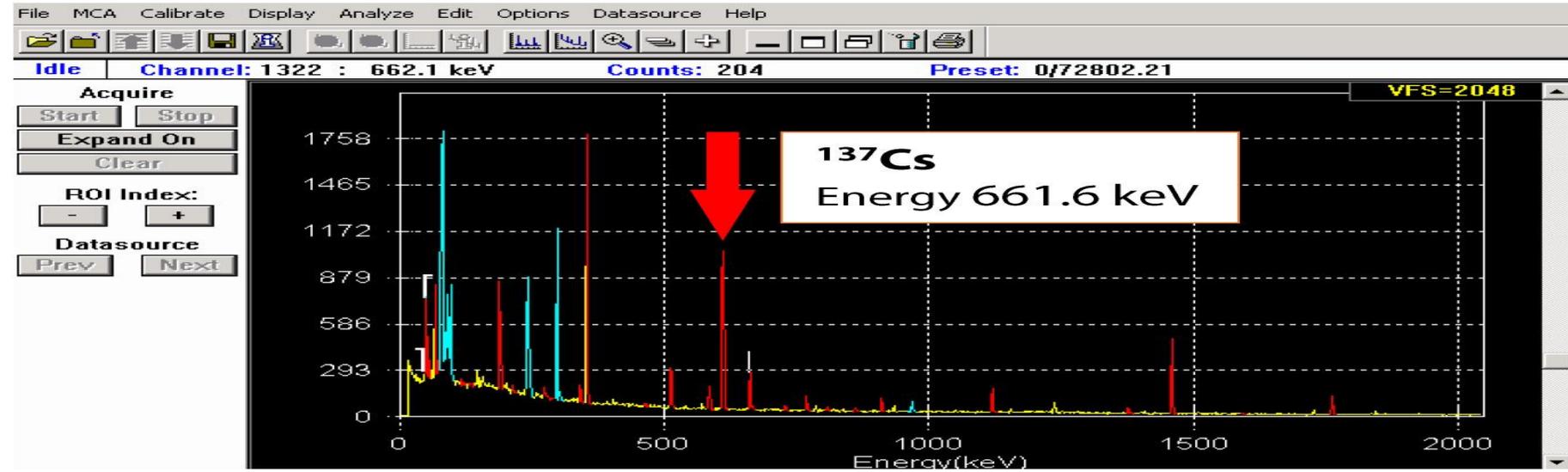
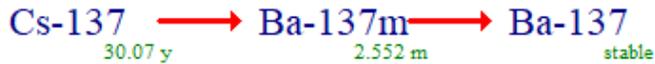
Espectros obtenidos con varios detectores gamma coaxiales de amplio rango y un detector de baja energía para ^{210}Pb .

OJO:

❖ Corrección de sumas en coincidencias (Monte Carlo)

❖ Resolución:

- ^{137}Cs con ^{214}Bi (609 KeV)
- ^{210}Pb con ^{241}Am (59 KeV)
- ^7Be con ^{214}Pb (352 KeV)





FINGERPRINT (FP)

**Huella de disimiles trazadores
(FRN; CSSI-($\delta^{13}\text{C}$); elementos químicos estables,
trazas, metales pesados y otros)**

FINGERPRINT

(identificar/discriminar fuentes de sedimentos)

Modelos de desmezcla
MiXSIAR y FINGERPRO

(origen de sedimentos)

FUENTES

MEZCLAS

Selección de Trazadores

fuentes

- FRN
- Elementos químicos
- CSSI

MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO

Identificación de los usos de suelo relevantes

Aportes de las FUENTES del suelo en las MEZCLA

Sitios de deposito (sedimento) = MEZCLAS (+)
Sitios de erosión (suelo) = FUENTES (-)

Sitio de muestreo

- Selección de fuentes y mezclas.
- Discriminación de fuentes y trazadores seleccionados.

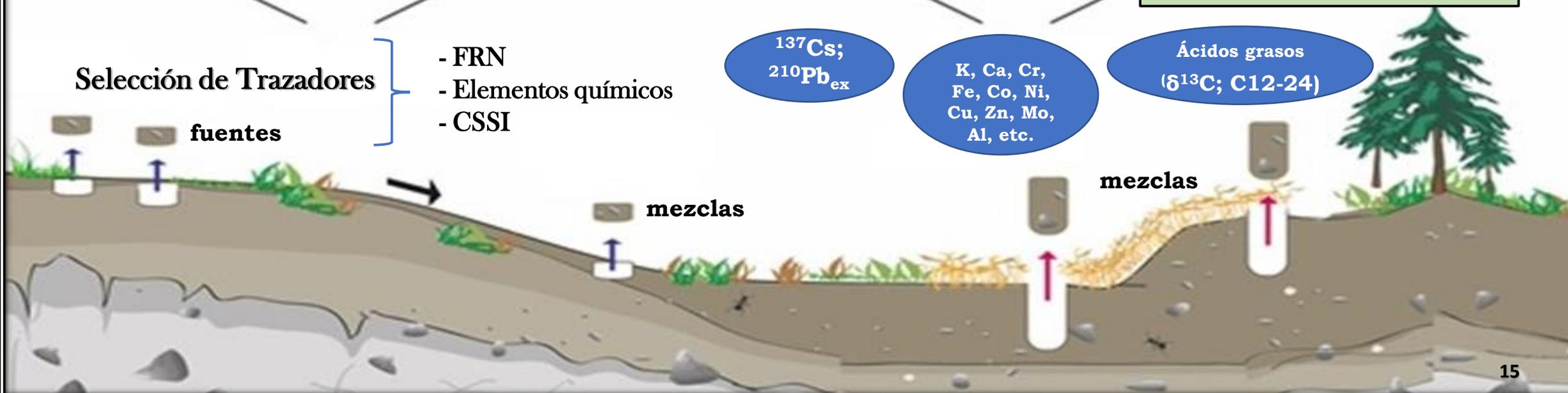
^{137}Cs ;
 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$

K, Ca, Cr,
Fe, Co, Ni,
Cu, Zn, Mo,
Al, etc.

Ácidos grasos
($\delta^{13}\text{C}$; C12-24)

mezclas

mezclas



Trazador (elementos químicos): Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.

Trazador (CSSI): Extractor de Solvente Acelerado; Cromatógrafo de Gases; Espectrómetro de Masa Infrarrojo; uso de 4 solventes (Diclorometano, Acetona, Exano y Metanol).

El equipamiento analítico de laboratorio para analizar muestras de sedimento en FP (CSSI) es complejo y caro. Los ácidos grasos son extraídos de la muestra mediante un **Extractor de Solvente Acelerado**, y son derivados a sus ésteres de metilo de ácidos grasos (FAME) para separarlos en ácidos grasos individuales mediante la **Cromatografía de Gases**, antes de su combustión y análisis en el **Espectrómetro de Masa Infrarrojo**.

Existen algunos países que logran tener este equipamiento:

- Estados Unidos de América.
- Brasil.
- Bélgica.
- Irlanda.
- Austria.



HIDROLOGÍA ISOTÓPICA (HI)

(^{14}C ; ^{18}O ; ^2H ; ^3H)

La composición isotópica de la lluvia está en función de la temperatura, el desgaste cinético de la nube y su humedad relativa (dependen de la latitud, altitud, variación estacional, continentalidad; etc.

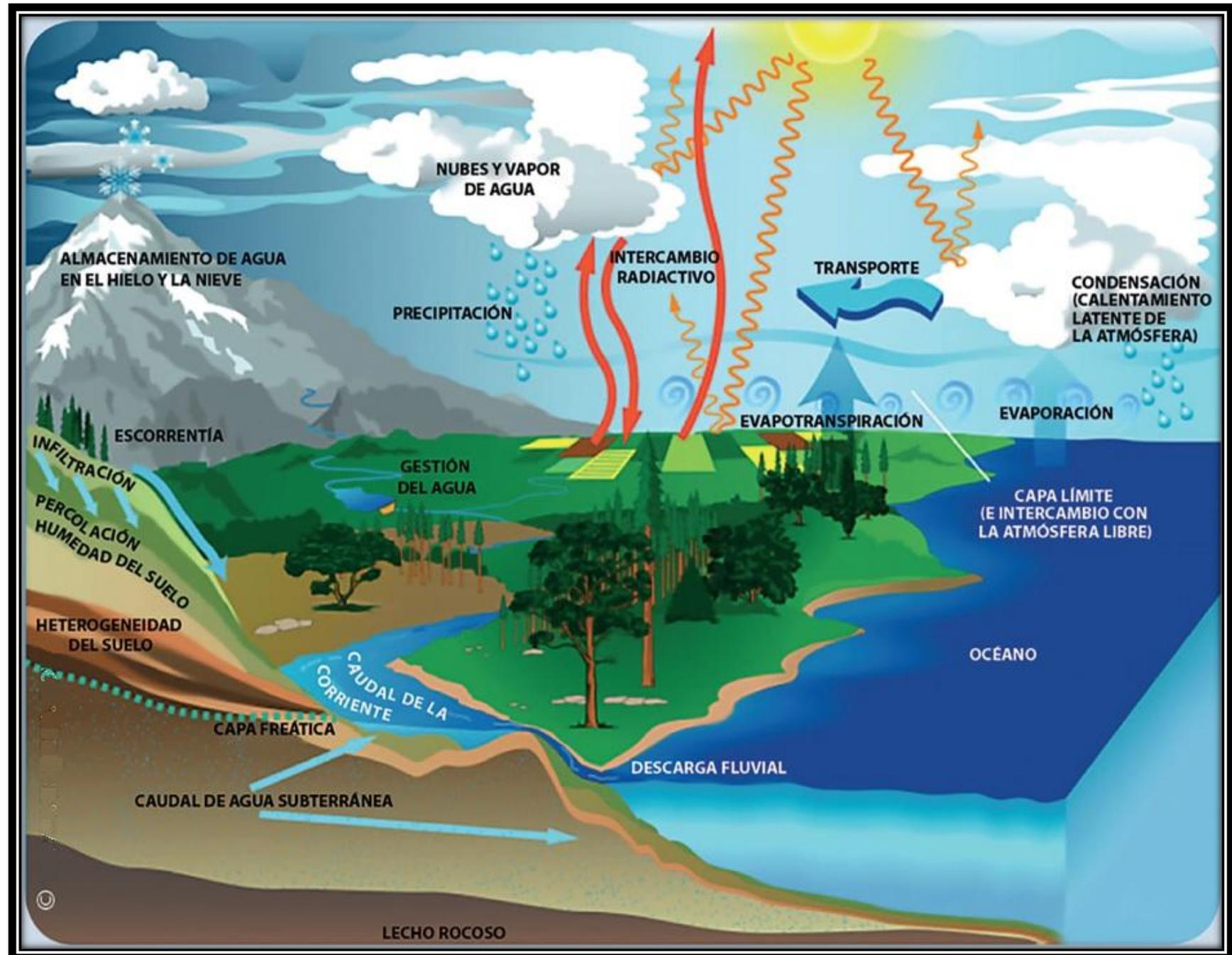
OJO:

Renovación de agua en atmósfera:

34 veces al año

Renovación de agua en Océanos:

cada 3 700 años



- Identifica Origen del agua y zonas de recarga
- Relación agua subterránea-agua superficial
- Mecanismos de salinización (vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación y la intrusión salina)
- Clasifica fuentes de aguas renovables y no renovables.
- Detección de mezclas (ej. con otros acuíferos, con aguas de riego, etc.).
- Identificación de fuentes de CH₄ (ej., yacimientos petróleo-gas)
- Geotermia
- Otras aplicaciones no convencionales (biología)



- Datar las aguas.
- Identificación de recarga reciente del acuífero
- Tiempo de residencia
- Fuentes de contaminación e infiltración de efluentes (ej. Basurales, Centrales atómicas)
- Transporte en la ZNS
- Determinación de velocidad infiltración (inyección artificial)
- Recuperación Secundaria (Petróleo)



- Datación (material orgánico, carbonatos, aguas)
- Dinámica agua subterránea



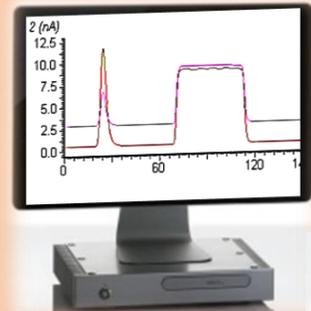
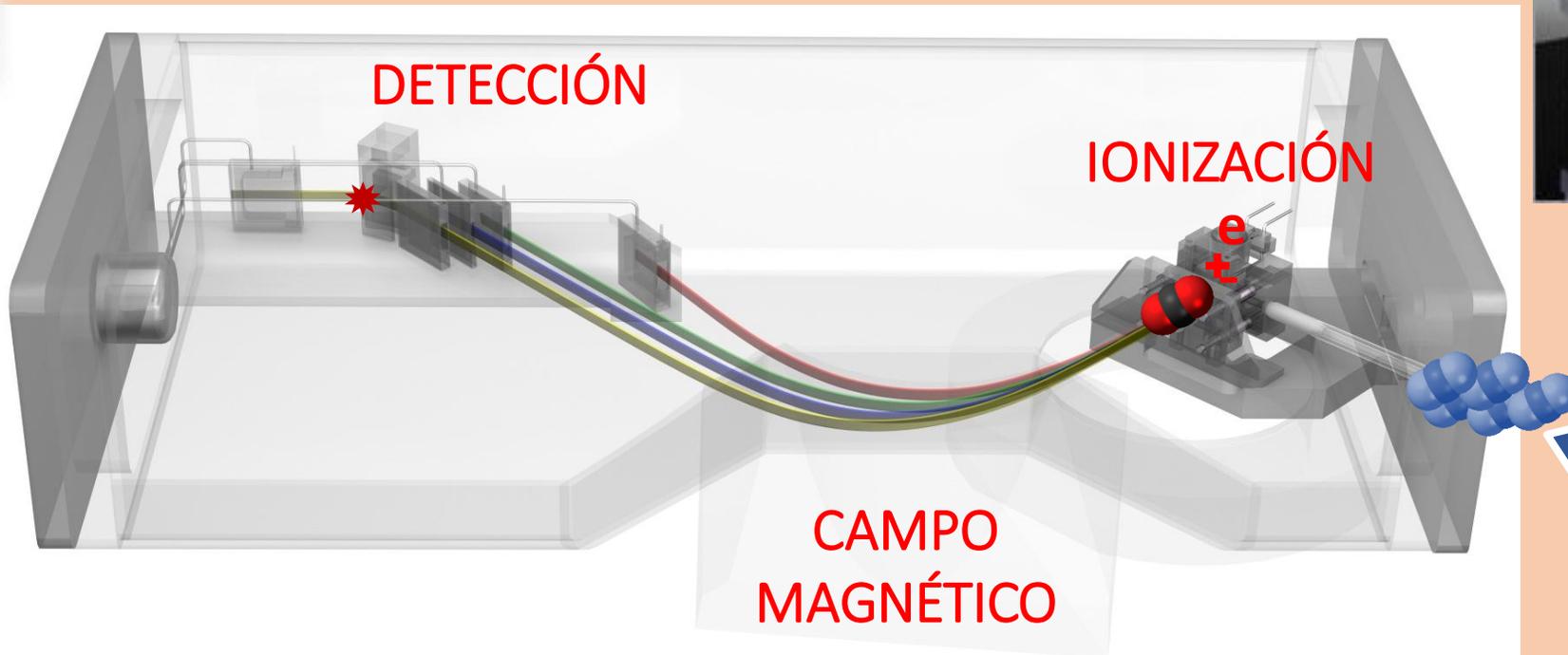
Espectrometría de masa (IRMS) determinar relaciones isotópicas

La muestra ingresa en forma gaseosa en un filamento ionizante - generando un haz de electrones - acelerados por una bomba de vacío y pasando por un campo magnético donde los iones son separados en trayectorias diferentes según su masa - siendo captado en un detector, la señal es amplificada y se transforma en relaciones isotópicas.

(VSMOW): Vienna Estándar Means Ocean Water



Entrada del gas (CO₂)



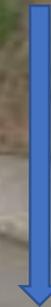
APLICACIÓN PRÁCTICA

Metodología de integración de las técnicas nucleares (FRN, CSSI, Hidrología isotópica) para evaluar impactos de la sedimentación en el paisaje y cuerpos de agua.

FRN

FP

Depósitos de delta erosionados en el paisaje



FP

FRN

HI

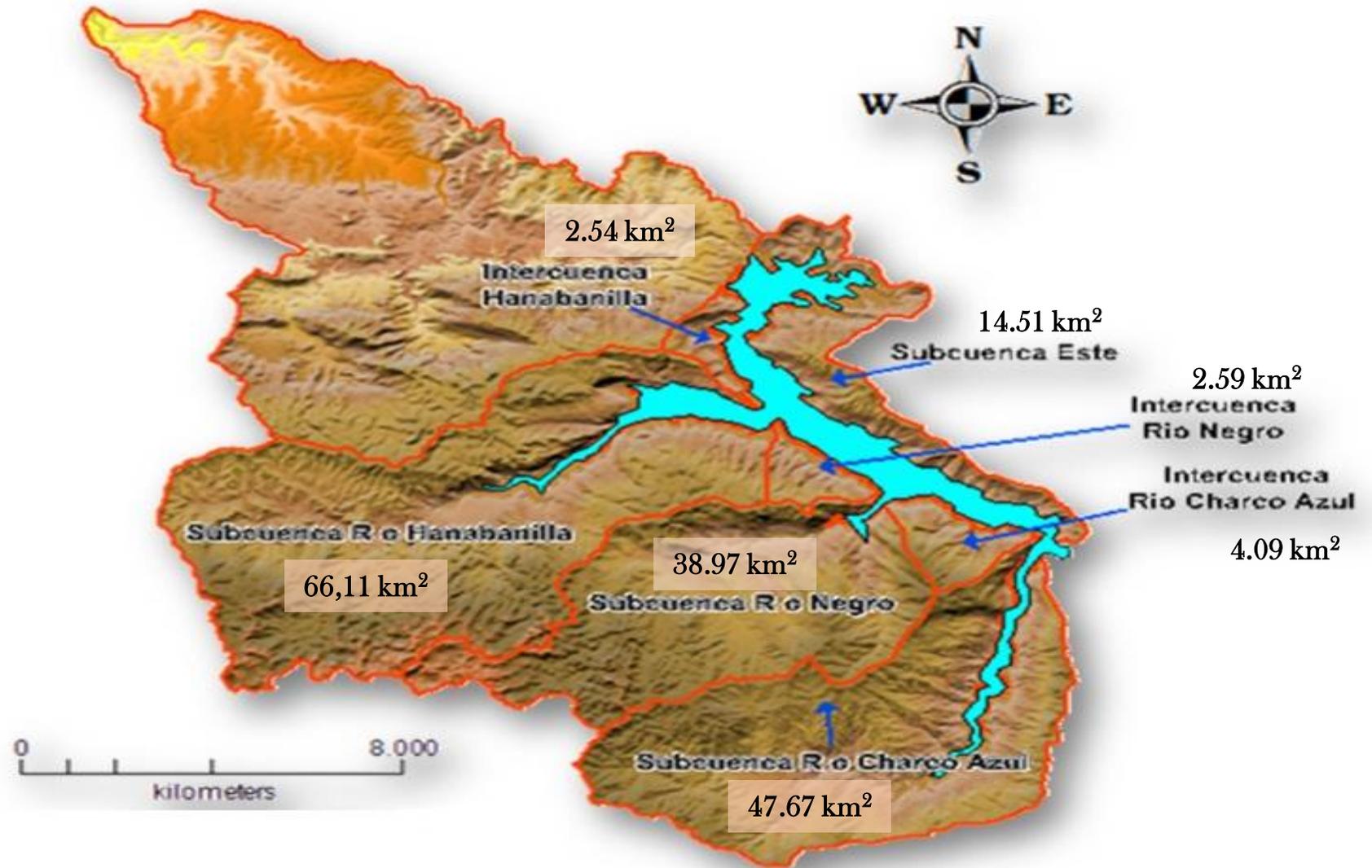
Caso de estudio
“Cuenca ARIMAO
Sub-cuenca HANABANILLA”

Selección del área de estudio



Modelo digital del terreno (área total de estudio)

Sub-Cuenca Hanabanilla
176.47 km²



Aplicación FRN

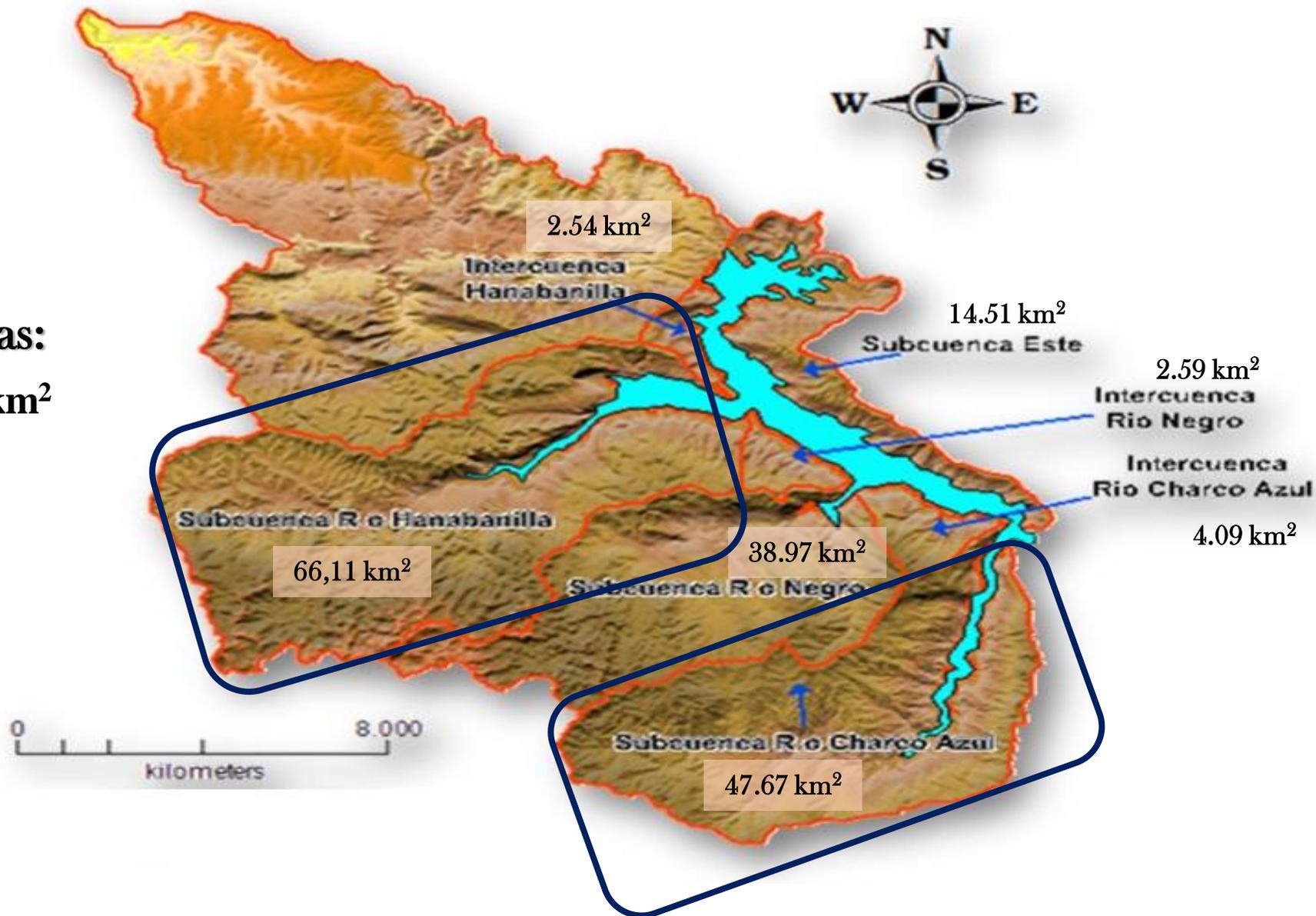
Objetivos:

- Aplicar modelos de conversión para interpretación de resultados analíticos.
- Identificar/cuantificar zonas de pérdida (erosión) y ganancia (sedimentación) en el paisaje y cuerpos de agua superficiales.
- Definir las tasas de erosión/deposición a escalas de subcuenca y sectores de subcuencas seleccionados.
- Seleccionar los sectores de sub-Cuenca relevantes en el área de estudio total.

Modelo digital del terreno (área total de estudio)

Sub-Cuenca Hanabanilla
176.47 km²

Sectores de Sub-Cuencas:
- Río Hanabanilla 113.78 km²
- Río Charco azul



Características generales

- Sectores con topografía asociada a zonas montañosas (Macizo del Escambray).
- Grandes pendientes, con niveles altos de escorrentía y de erosión hídrica.
- Variados usos de suelos (Forestal, áreas protegidas, café, cultivos temporales, asentamientos poblacionales).
- Aplicación integrada de las técnicas nucleares y conexas (**Convergencia sinérgica**).

FRN (^{137}Cs); FingerPrint (CSSI); Hidrología Isotópica (^{18}O y ^2H); Datación sedimentos (^{137}Cs y ^{210}Pb); Geoquímica del agua.

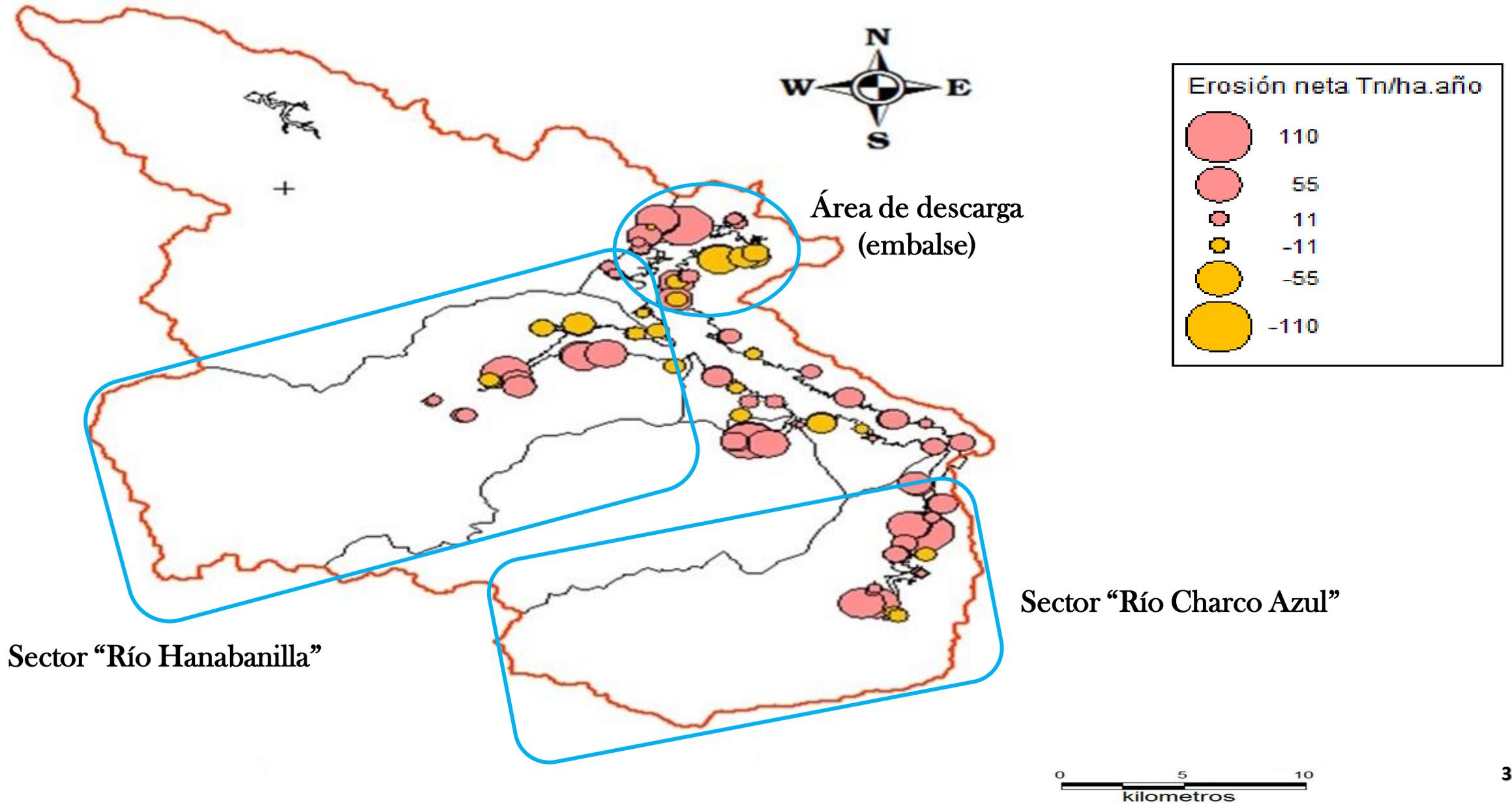
Sector “Río Hanabanilla”		Sector “Charco Azul”	
FRN	FP (CSSI)	FRN	FP (CSSI)
FRN-40, FRN-41, FRN-42, FRN-43, FRN-44, FRN-45, FRN-46, FRN-47, FRN-48, FR-49, FRN-50, FRN-51, FRN-52, FRN-53, FRN-54, FRN-55, FRN-56, FRN-57, FRN-58, FRN-59, FRN-60, FRN-61, FRN-62, FRN-63, FRN-64, FRN-65, FRN-66, FRN-67	CSSI 11.1, CSSI 12.1, CSSI 13.1, CSSI 14.1, CSSI 15.1, CSSI 16.1, CSSI32, CSSI33, CSSI37	FRN1, FRN2, FRN3, FRN4, FRN_79, FRN_80, FRN_81, FRN_82, FRN_117, FRN_118, FRN_119, FRN_120, FRN_121, FRN_122, FRN_123, FRN_124, FRN_125, FRN_126, FRN_127, FRN_128	CSSI1.1, CSSI2.1, CSSI3.1, CSSI4.1, CSSI5.1, CSSI6.1, CSSI7.1, CSSI 22, CSSI 24, CSSI 25, CSSI27, CSSI28, CSSI29, CSSI30, CSSI34, CSSI31, CSSI35
28	9	20	17

8 muestras (sitio referencia)

56 muestras (FRN) (sitio referencia)

25 muestras FP (CSS) = fuentes y mezclas

EROSION NETA estimada de suelo



Aplicación FINGERPRINT (CSSI)

Objetivos:

- Discriminar los aportes de sedimentos en las áreas de estudios.
- Incorporar los resultados de otras técnicas nucleares (FRN).
- Evaluar los impactos de la integración de otras técnicas nucleares para evaluar degradación de recursos de agua y suelo.

Integración de las técnicas FRN-FINGERPRINT

- Hipótesis. La integración de los resultados de FRN y FINGERPRINT facilitan la estrategia de muestreo (fuentes de sedimentos y de mezcla), apoyan la interpretación de los resultados y permiten con la menor incertidumbre, cuantificar las degradaciones, identificar las causas y la fuente de la degradación.
 - Valores negativos de redistribución de suelos (potenciales zonas de fuentes de sedimentos).
 - Valores positivos de redistribución de suelos (potenciales zonas de mezclas de sedimentos).

Sector “Río Hanabanilla”

- **FUENTES (3):** (S1 - Forestal; S2 - Cultivos varios; S3 - Café).
- **MEZCLA (1).**

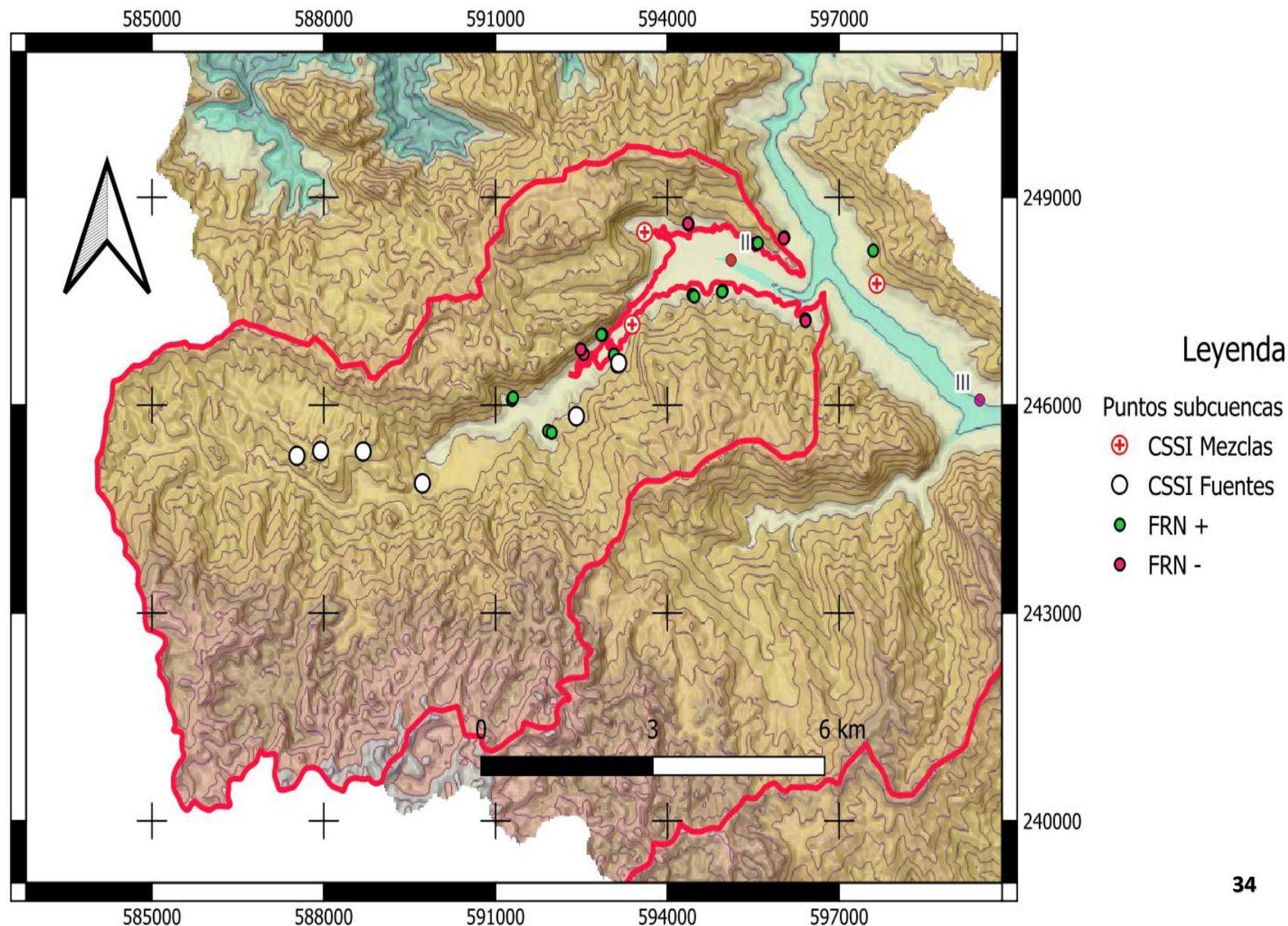
Aplicación Fingerprint (CSSI): Sector “Río Hanabanilla”

- **Aplicación de modelos de mezcla (FingerPro):**

- Con puntos mezclas y fuentes seleccionados según resultados FRN (+/-).
- NO se toma en cuenta los puntos anteriores.

- **Evaluación comparativa de los resultados.**

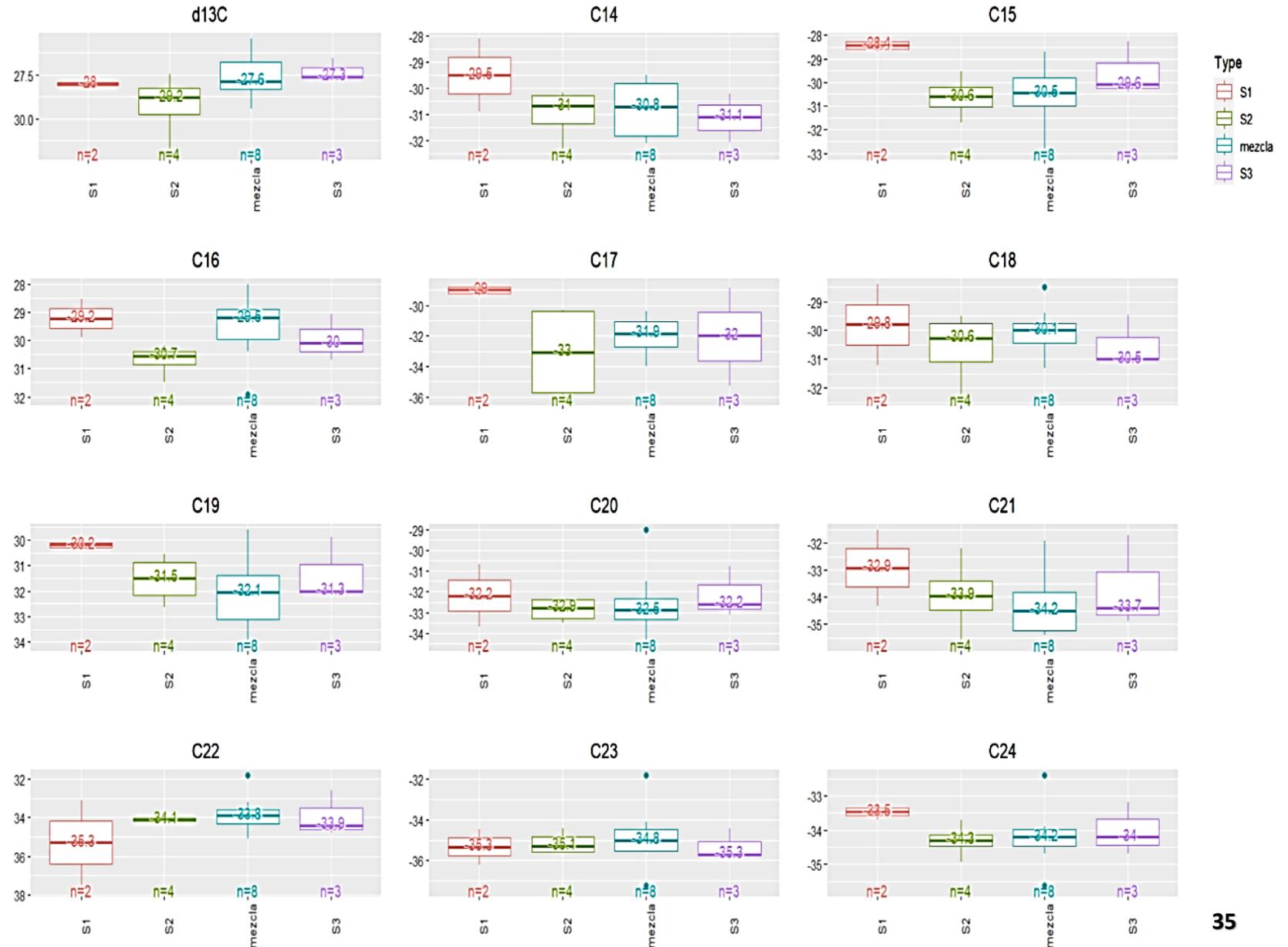
- **Análisis realizados:** Pruebas de rango, componentes principales, remoción de variables, bondad de ajuste, gráficos de aportes.



Resultados FingerPro (SI - Integración con FRN)

Sector "Río Hanabanilla"

- Se incorporan 2 puntos, según criterio de integración: mezcla (+) CSSI 25 y fuente(-) CSSI 34.
- Gráficos de caja identifican comportamiento de los rangos de las variables de cada fuente en relación con las mezclas.
- La prueba de rango elimina 9 variables que no cumplen los criterios (C14 C15 C16 C17 C21 C22 C24 C26 d¹³C)
- Análisis PCA explica el 78% de variabilidad
- El índice de conservatividad lista x orden de prioridad:
 1- C30 88.70, 2- C33 82.90, 3- C34 82.85,
 4- C32 81.15, 5- C18 79.65, 6- C27 79.50.

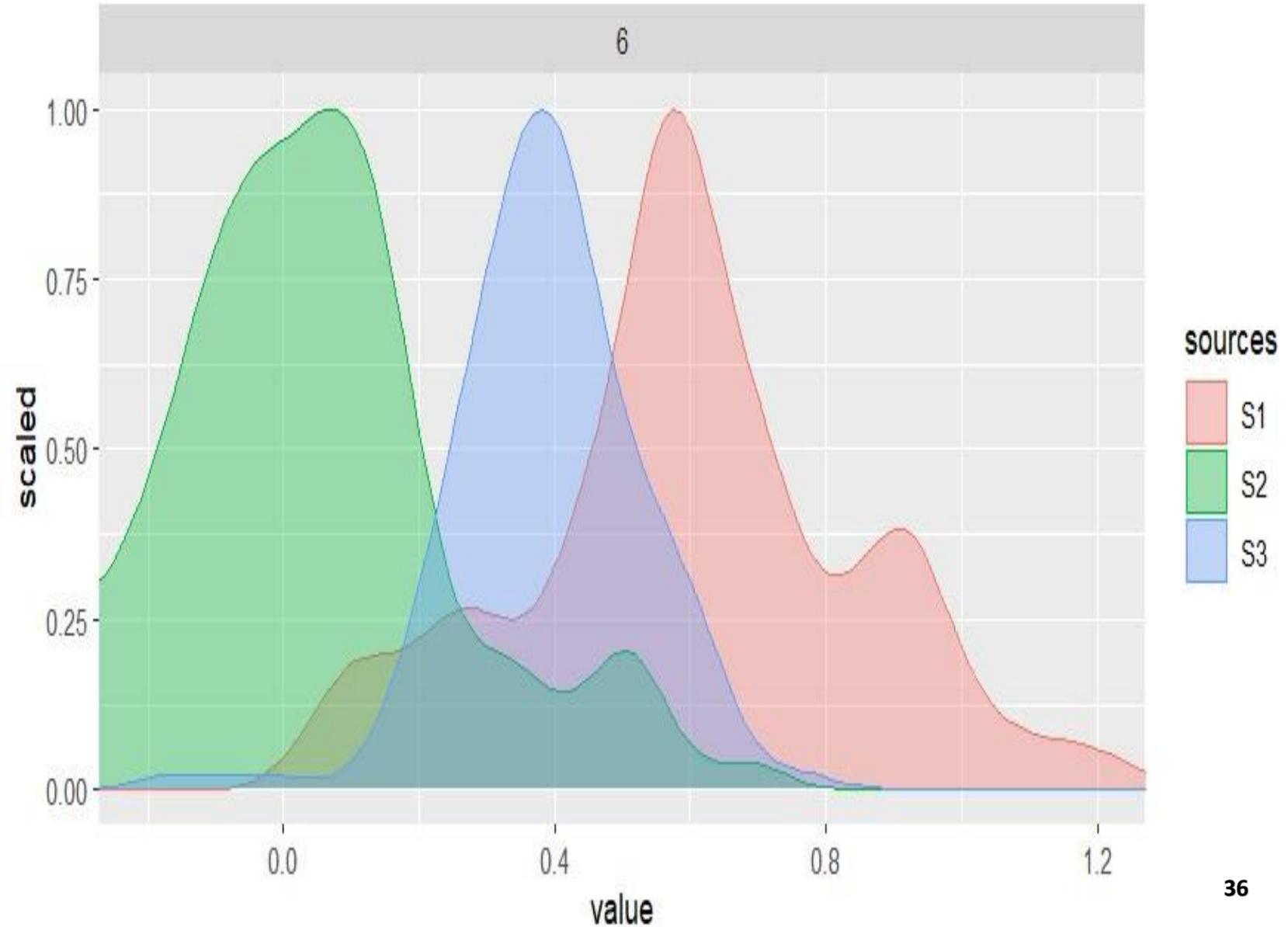


Resultados FingerPro (SI - Integración con FRN)

Sector "Río Hanabanilla"

Resultados de los aportes:

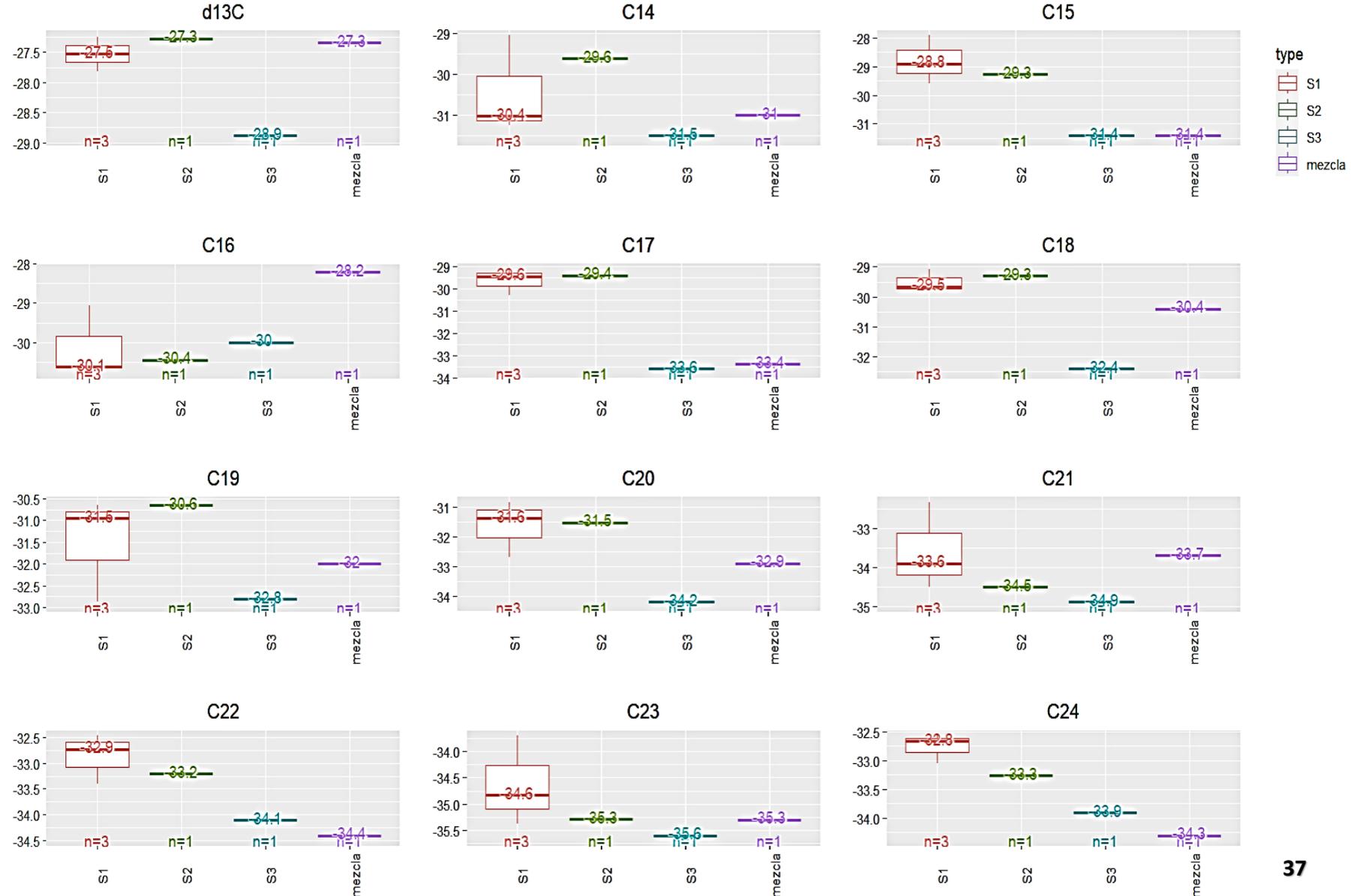
- Fuente S1 (Forestal) aporta el 50%, S2 (Cultivo) 40% y S3 (Café) 10%.
- Bondad de ajuste de la solución **0.909**



Resultados FingerPro (NO - Integración con FRN)

Sector "Río Hanabanilla"

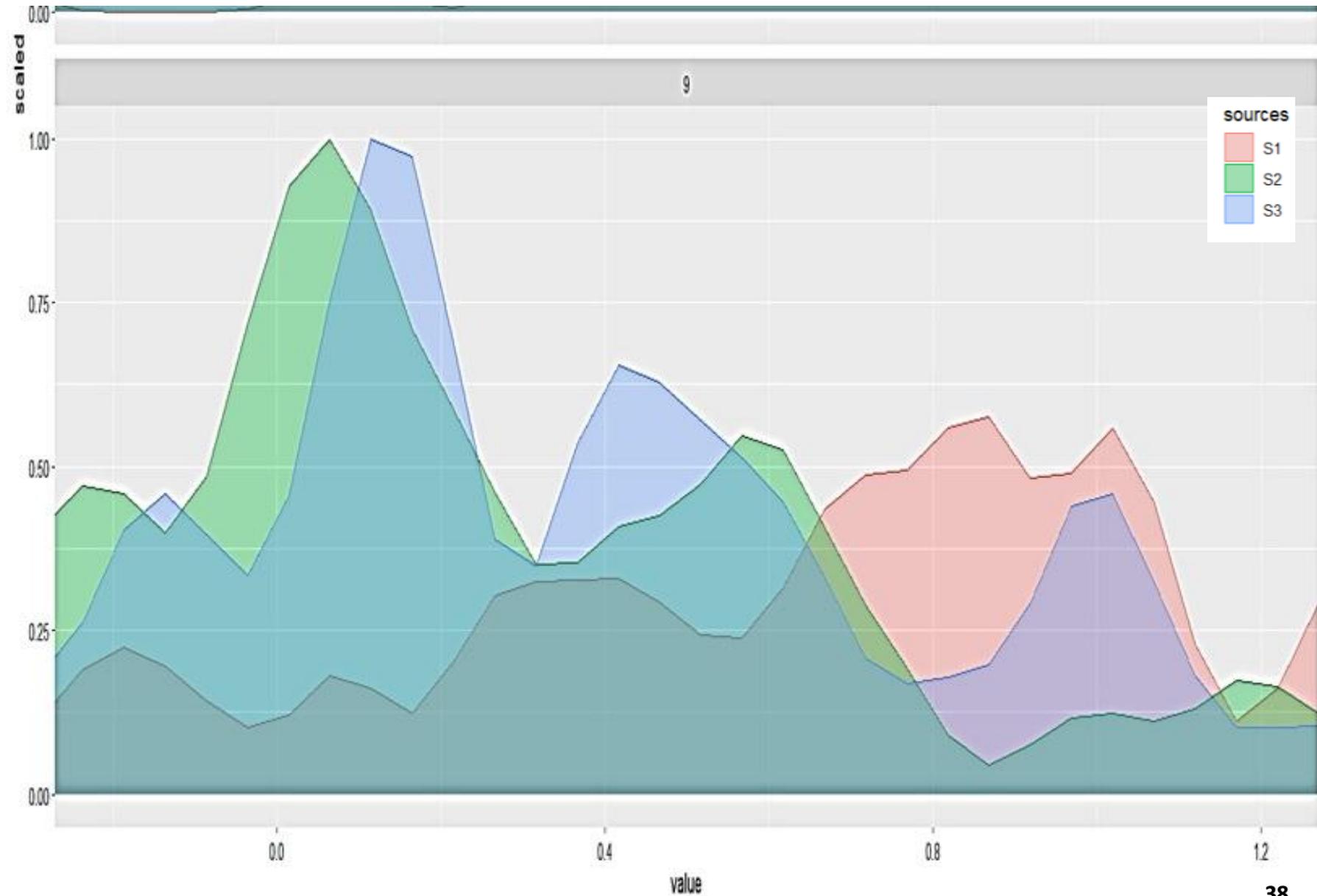
- No se incluyen los 2 puntos, anteriores (fuente CSSI 25 y mezcla CSSI 34).
- Gráficos de caja NO identifican los rangos de las variables de cada fuente en relación con las mezclas.
- Análisis PCA explica el 77% de la variabilidad.
- Se eliminan 5 trazadores que no cumplen los criterios.



Resultados FingerPro (NO - Integración con FRN)

Sector "Río Hanabanilla"

- Solución con múltiples picos, poco precisa definición de los aportes de las fuentes.
- Bondad de ajuste de la solución 0.70, más baja que la anterior corrida.



Sector “Río Charco Azul”

- **FUENTES (3): (S1 - Forestal; S2 - Café; S3 - Frutales).**
- **MEZCLA (1).**

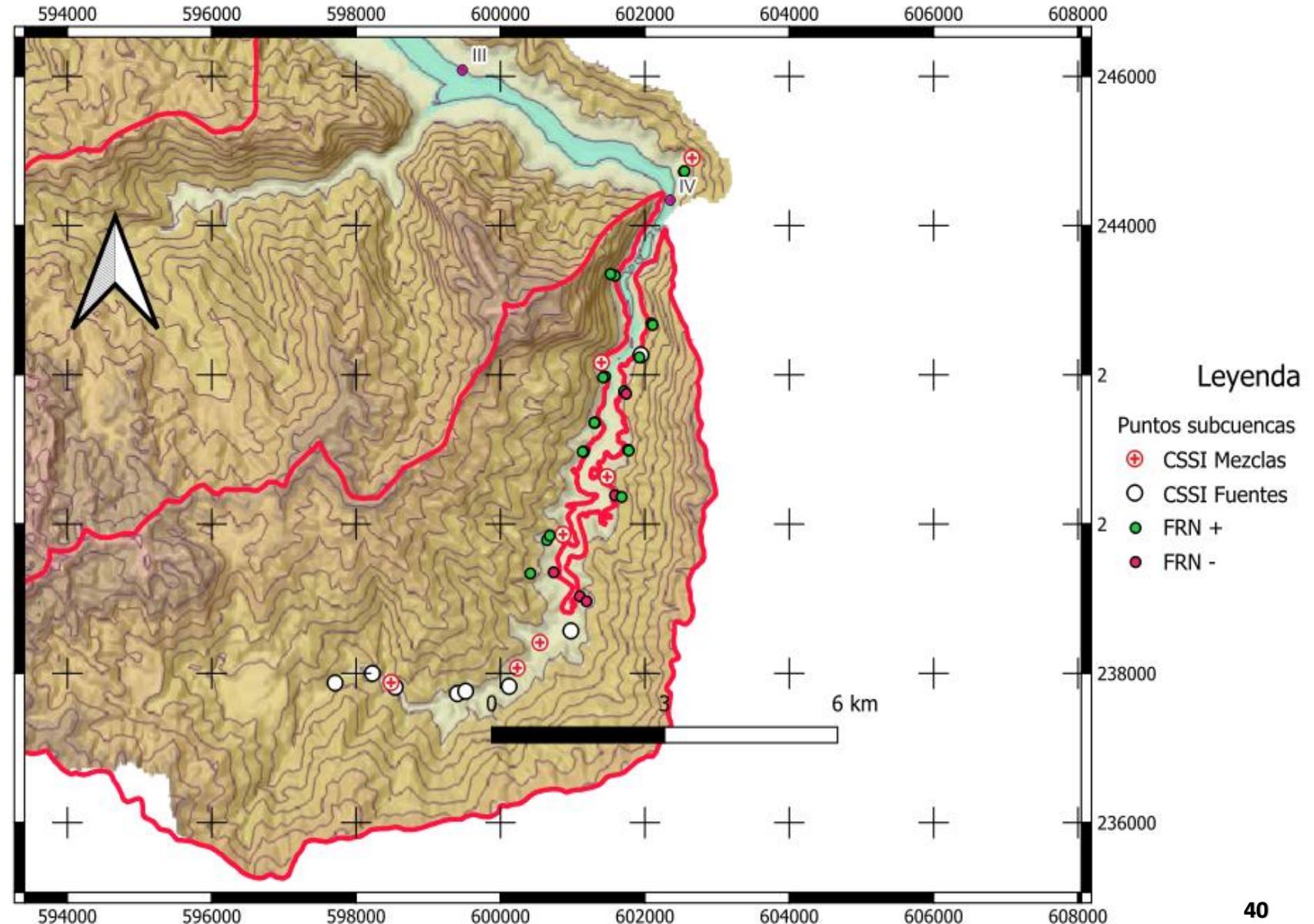
Aplicación Fingerprint (CSSI) “Río Charco Azul”

- Aplicación de modelos de mezcla (FingerPro):

- Con puntos mezclas y fuentes según resultados FRN (+/-)
- NO se toma en cuenta los puntos anteriores

- Evaluación comparativa de los resultados.

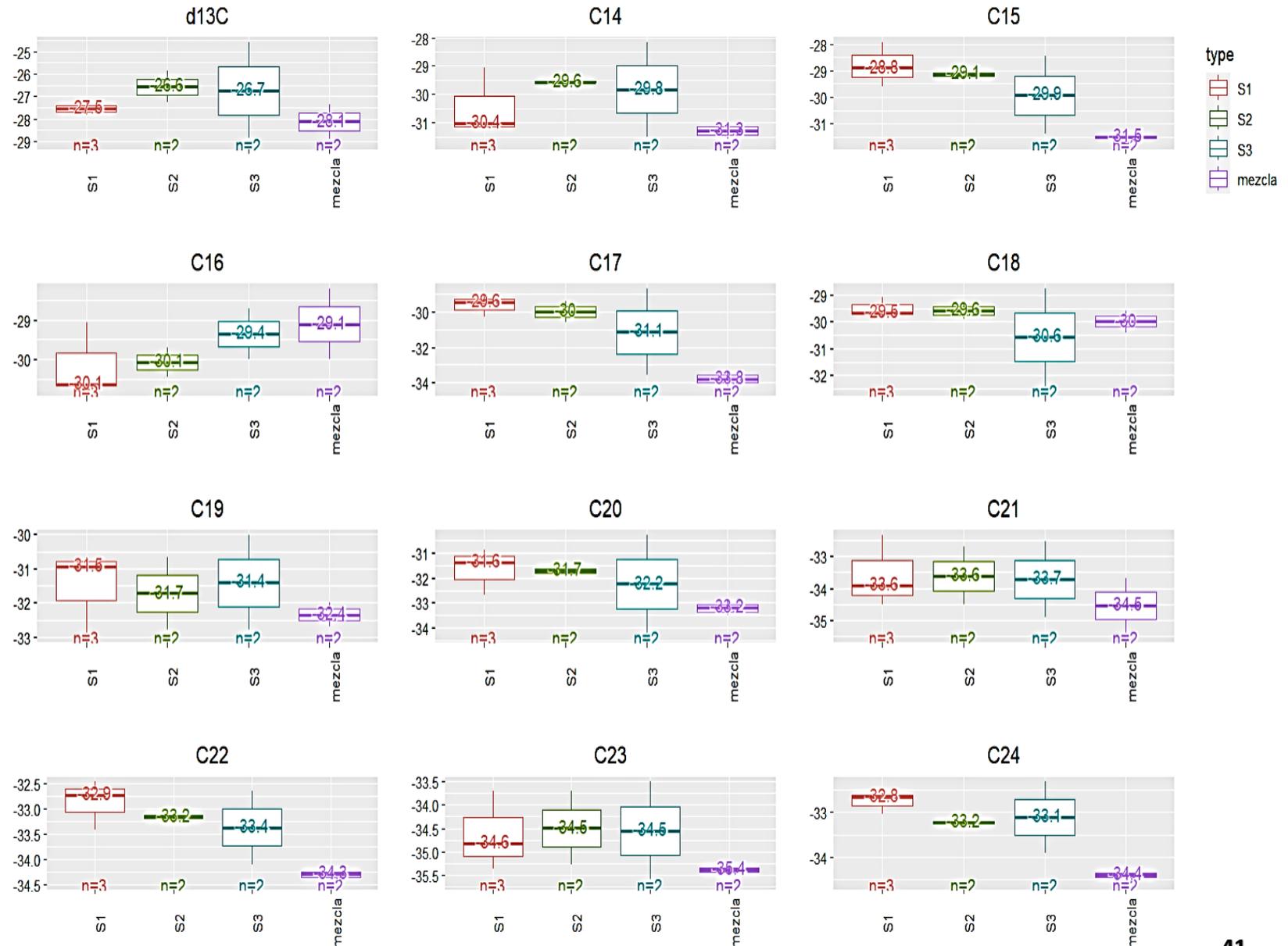
- Análisis realizados: pruebas de rango, componentes principales, remoción de variables, bondad de ajuste, gráficos de aportes.



Resultados FingerPro (SI - Integración con FRN)

“Río Charco Azul”

- Se incorporan 2 puntos, según criterio de integración: fuente (+) CSSI 15.1 y mezcla (-) CSSI 33.
- Gráficos de caja identifican comportamientos de rangos de las variables de cada fuente en relación con las mezclas.
- Prueba de rango elimina una variable que no cumplen los criterios (C33).
- Análisis PCA explica el 60% de variabilidad.
- El índice de conservatividad establece:
 - 1- C26 93.85, 2- C32 90.90, 3- C34 90.65,
 - 4- $d^{13}C$ 88.75, 5- C18 86.80, 6- C24 86.00

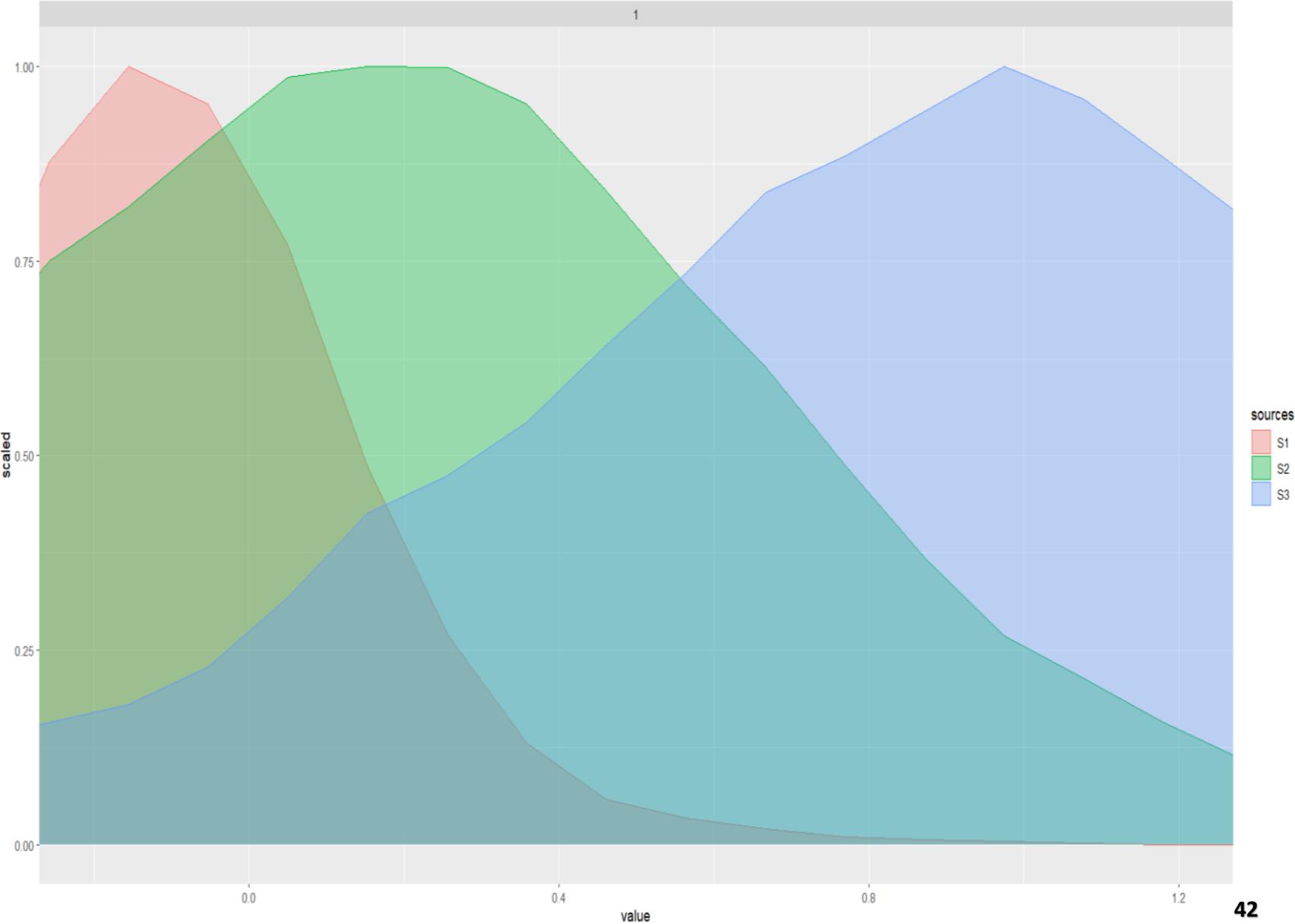


Resultados FingerPro (SI - Integración con FRN)

“Río Charco Azul”

Resultados de los aportes:

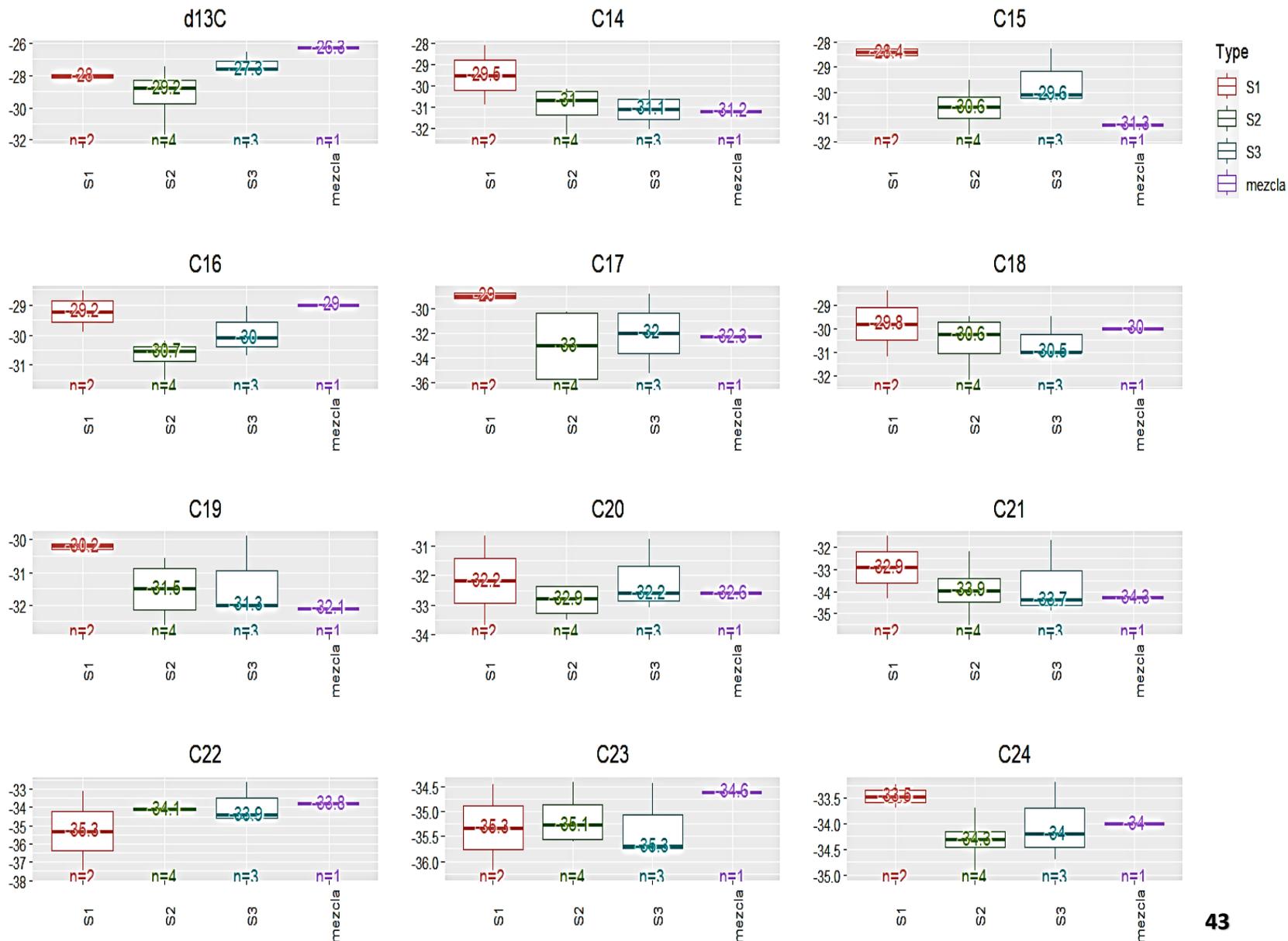
- Fuente S1 (Forestal) aporta el 50%, S2 (Café) 40% y S3 (Frutales) 10%
- Bondad de ajuste de la solución 0.86



Resultados FingerPro (NO - Integración con FRN)

“Río Charco Azul”

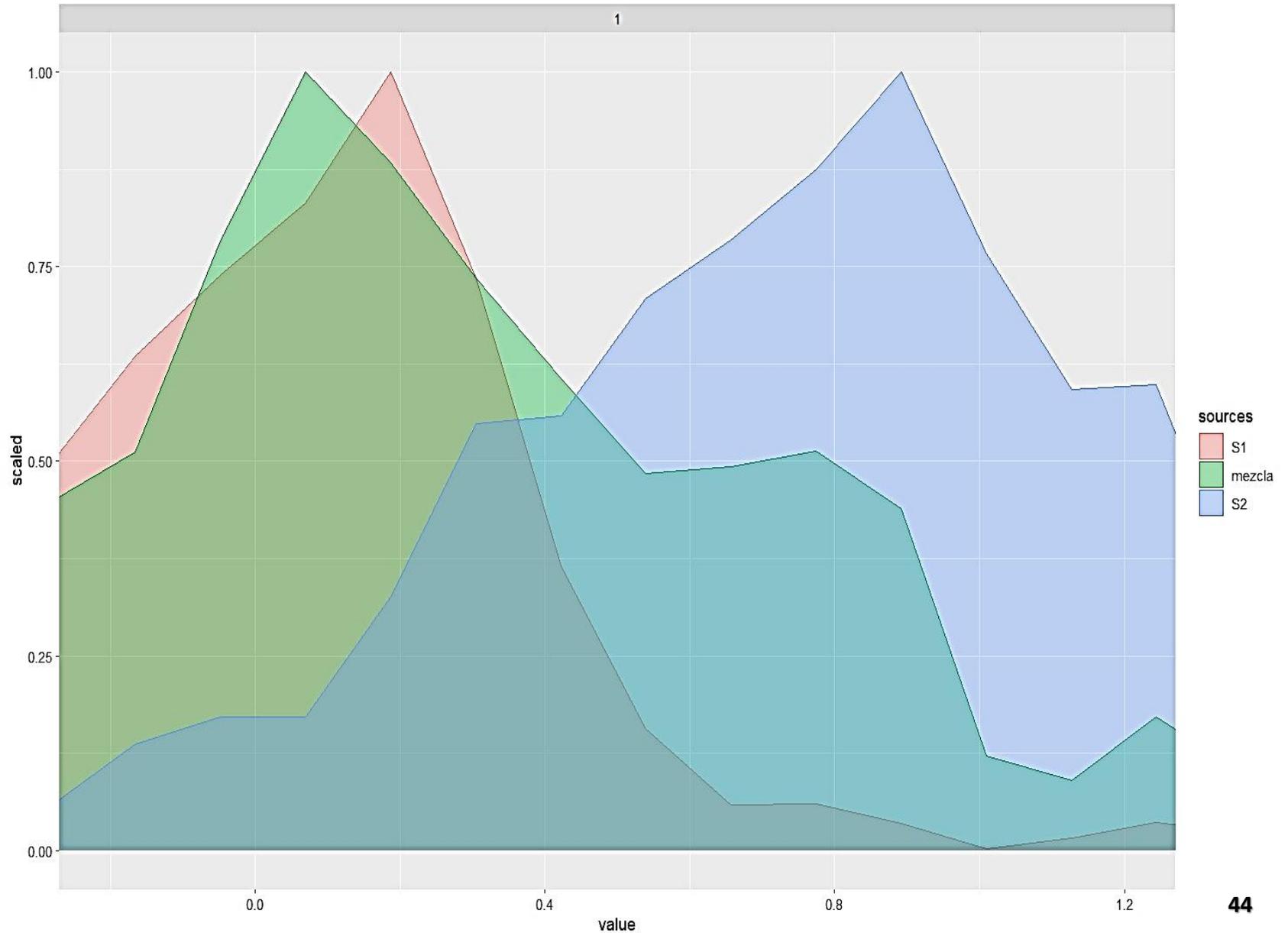
- No se incluyen los 2 puntos anteriores: fuente (+) CSSI 15.1 y mezcla (-) CSSI 33.
- Gráficos de caja NO identifican comportamientos de rangos de las variables de cada fuente en relación con las mezclas.
- Prueba de rango elimina variable que no cumplen los criterios ($d^{13}C$).
- Análisis PCA explica el 58% de variabilidad.
- El índice de conservatividad establece:
1- C17 89.00, 2- C24 88.65, 3- C20 86.40, 4- C28 85.55, 5- C25 85.05, 6- C27 84.30.



Resultados FingerPro (NO - Integración con FRN)

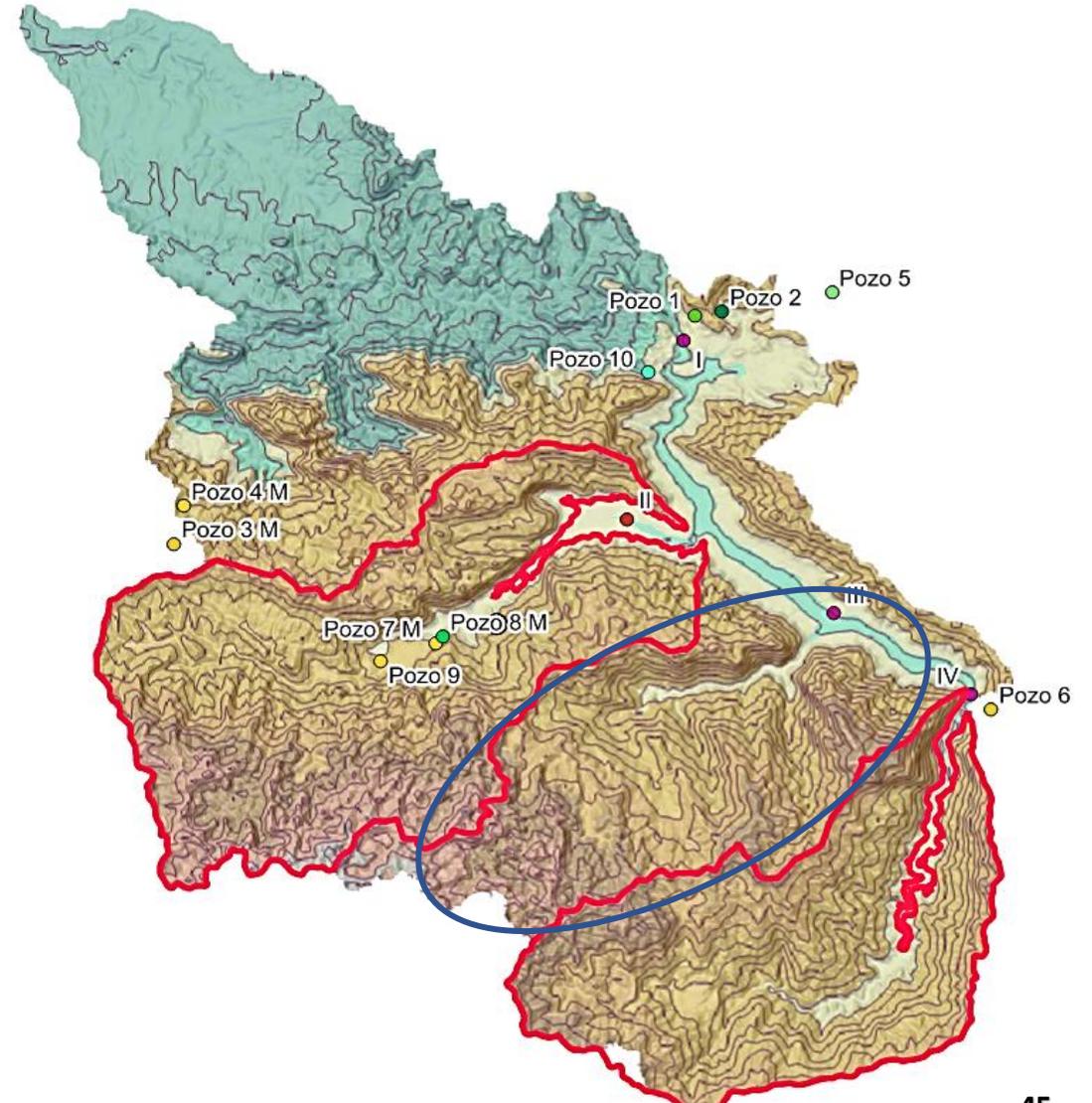
“Río Charco Azul”

- Solución con múltiples picos, **poco precisa** la definición de los aportes de las fuentes (no incluye la fuente 3).
- Bondad de ajuste de la solución **0.70**, más baja que la anterior corrida.



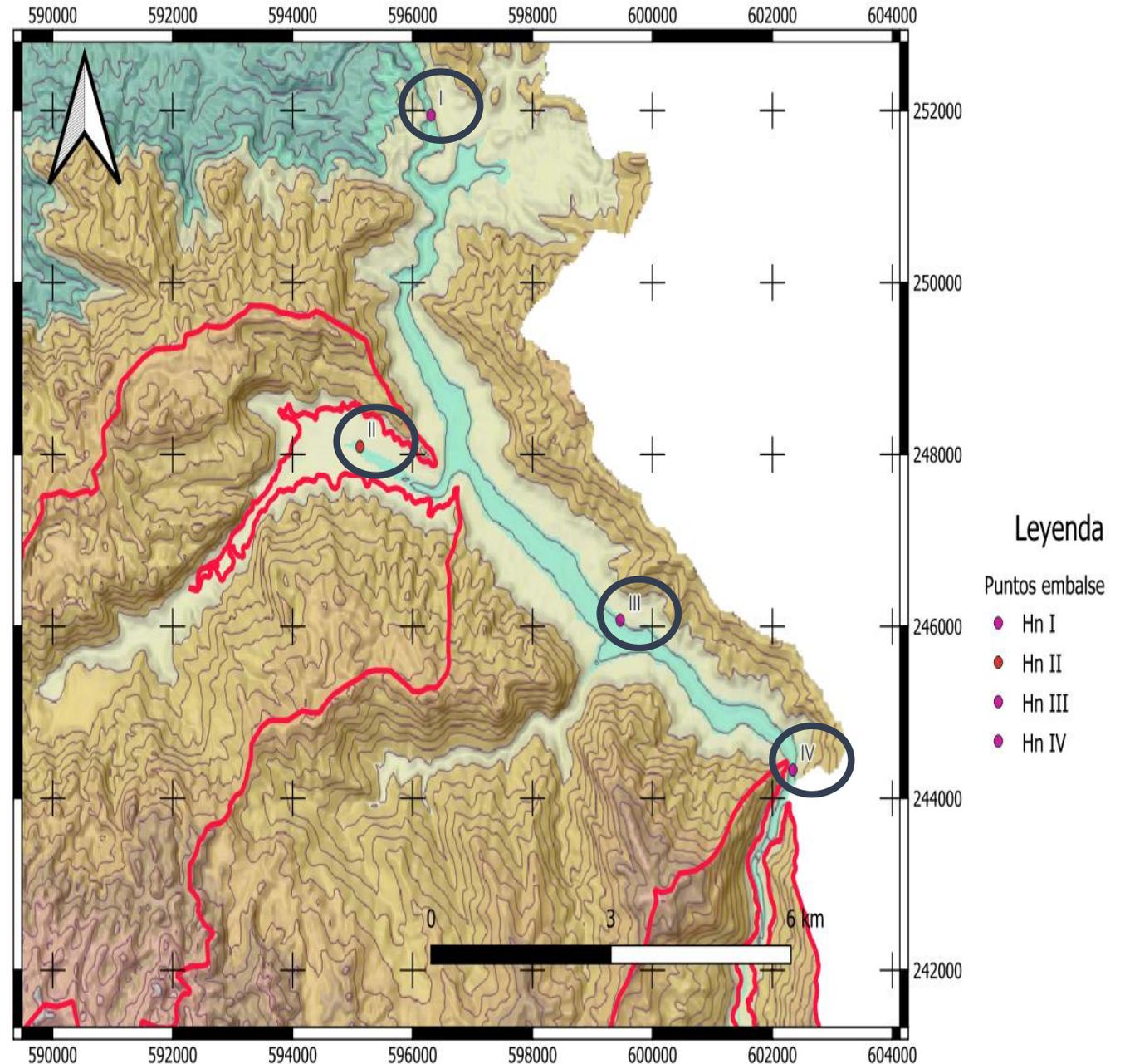
Aplicación HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

- Aplicaciones basadas en mediciones de ^{18}O , ^2H , macro-componentes y otros parámetros físico-químicos en agua de lluvia, pozos y en el embalse.
- Aplicando técnica FingerPrint a los recursos hídricos se evalúan los aportes de las descargas de agua de los 3 principales ríos en la zona de estudio (río Hanabanilla (II), río Negro (III) y río Charco Azul (IV) de la subcuenca Hanabanilla en la toma de agua del embalse (I).



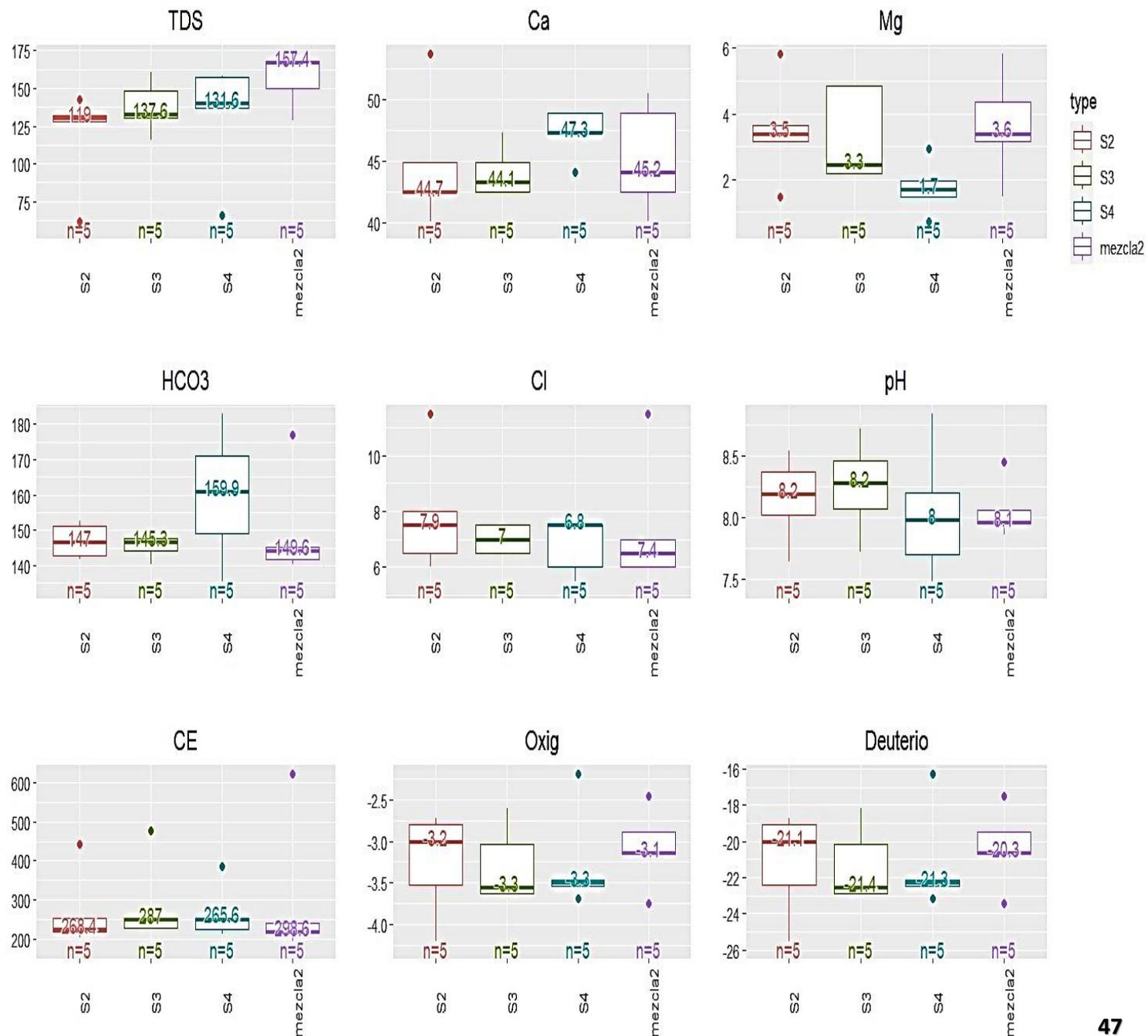
Resultados FingerPro (Integración con HI)

- La integración de las técnicas nucleares incorpora las herramientas FingerPrint al procesamiento e interpretación de los resultados y **realiza vínculos con FRN y CSSI**.
- Se analizaron los aportes hídricos dentro del embalse de los 3 principales sectores de cuencas (Río Hanabanilla II, Río Negro III y Charco Azul IV) como posibles fuentes. La muestra de la mezcla se tomó en el punto I (obra de toma de agua de la hidroeléctrica y salida de las aguas del embalse).
- Se empleó la herramienta FingerPro, como trazadores; los macrocomponentes del agua, datos físico químicos y los valores de los isótopos medidos.



Resultados FingerPro (Integración con HI)

- Adicionando los datos de la HI se evalúan los aportes de las aguas de los diferentes sectores de subcuenca en la zona de descarga del embalse.
- Los gráficos de caja identifican el comportamiento de los rangos de los trazadores de cada fuente en relación con la mezcla evaluada (toma de agua).
- La prueba de rango no eliminó ninguna variable, todas cumplen los criterios. Se mantienen todas las variables en el análisis (TDS, Ca, Mg, HCO₃, Cl, pH, Temp, ¹⁸O, Deuterio).
- El índice de conservatividad listó x orden de prioridad las variables:
1 Temp 98.35, 2 HCO₃ 85.70, 3 CE 85.25, 4 pH 71.25, 5 CL 67.20, 6 TDS 54.45.

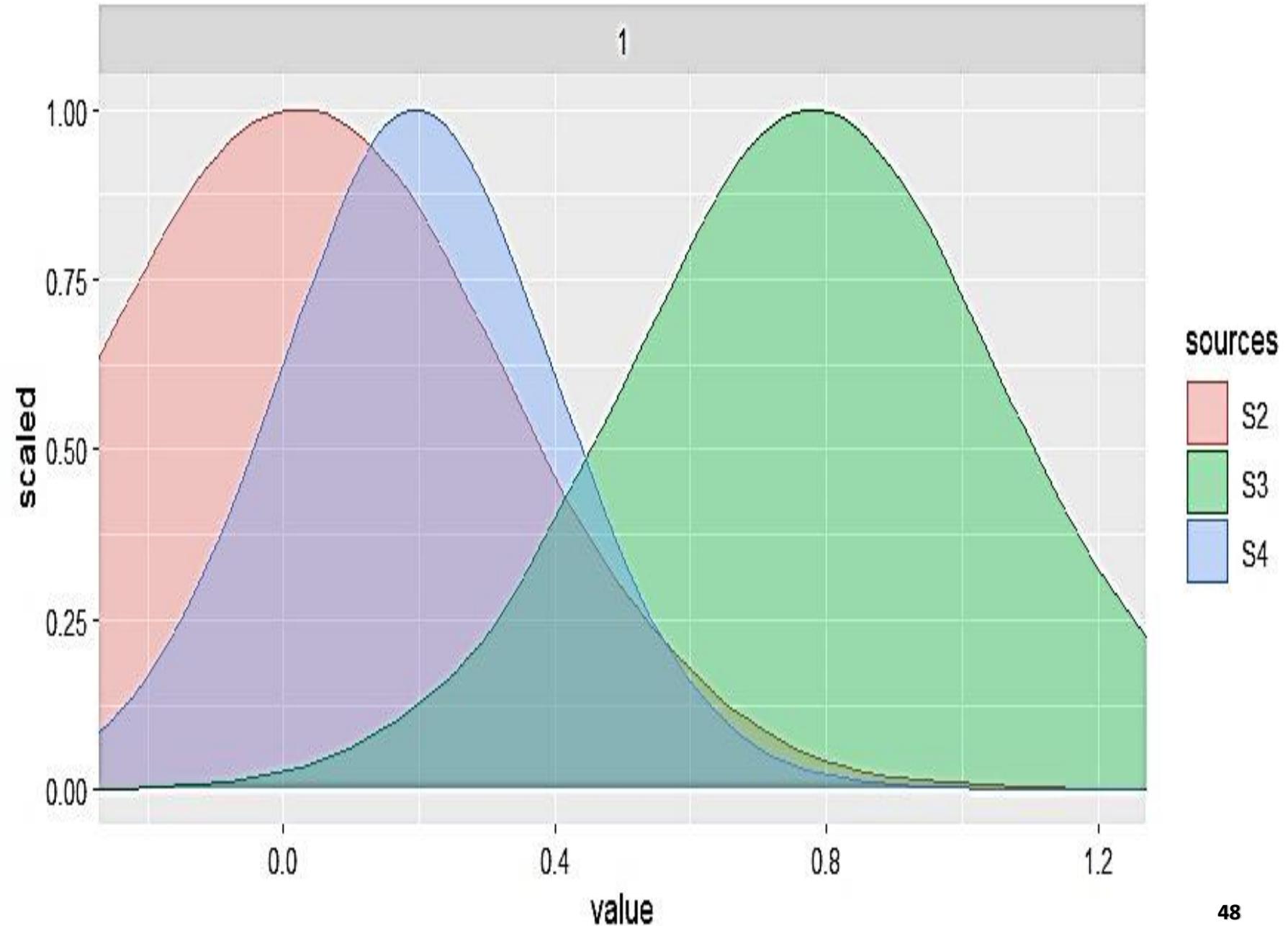


Resultados FingerPro (Integración con HI)

- Se identifican los diferentes aportes a las aguas en el punto final de mezcla del embalse:

El sector **Río Negro (S3)** influye con el **78%** y mucha menor medida el sector **Charco Azul (S4)** con **15%** y **Hanabanilla (S2)** con **7%**.

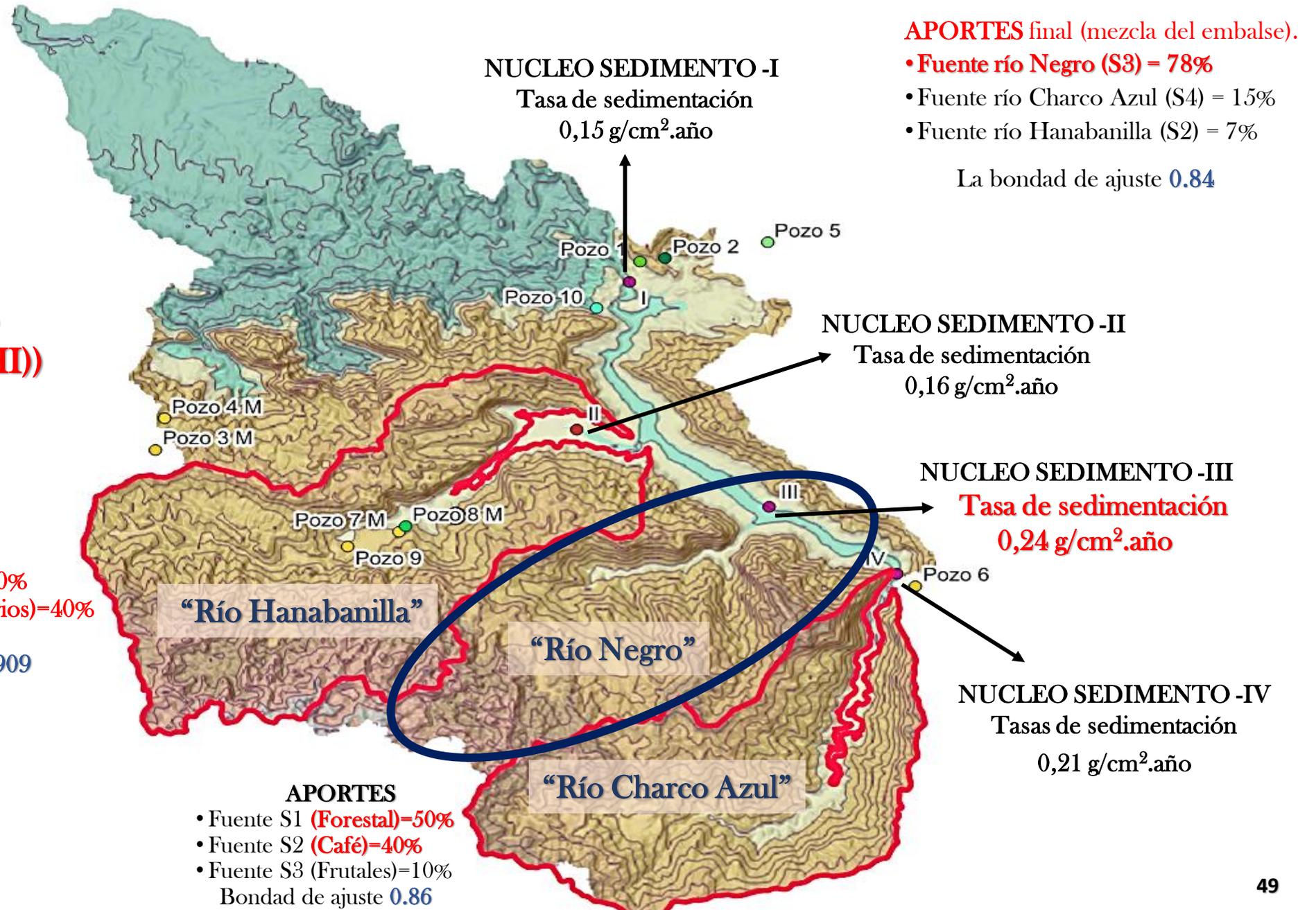
- La bondad de ajuste **0.84**



Resultados INTEGRADOS (Integración FRN-FP-HI)

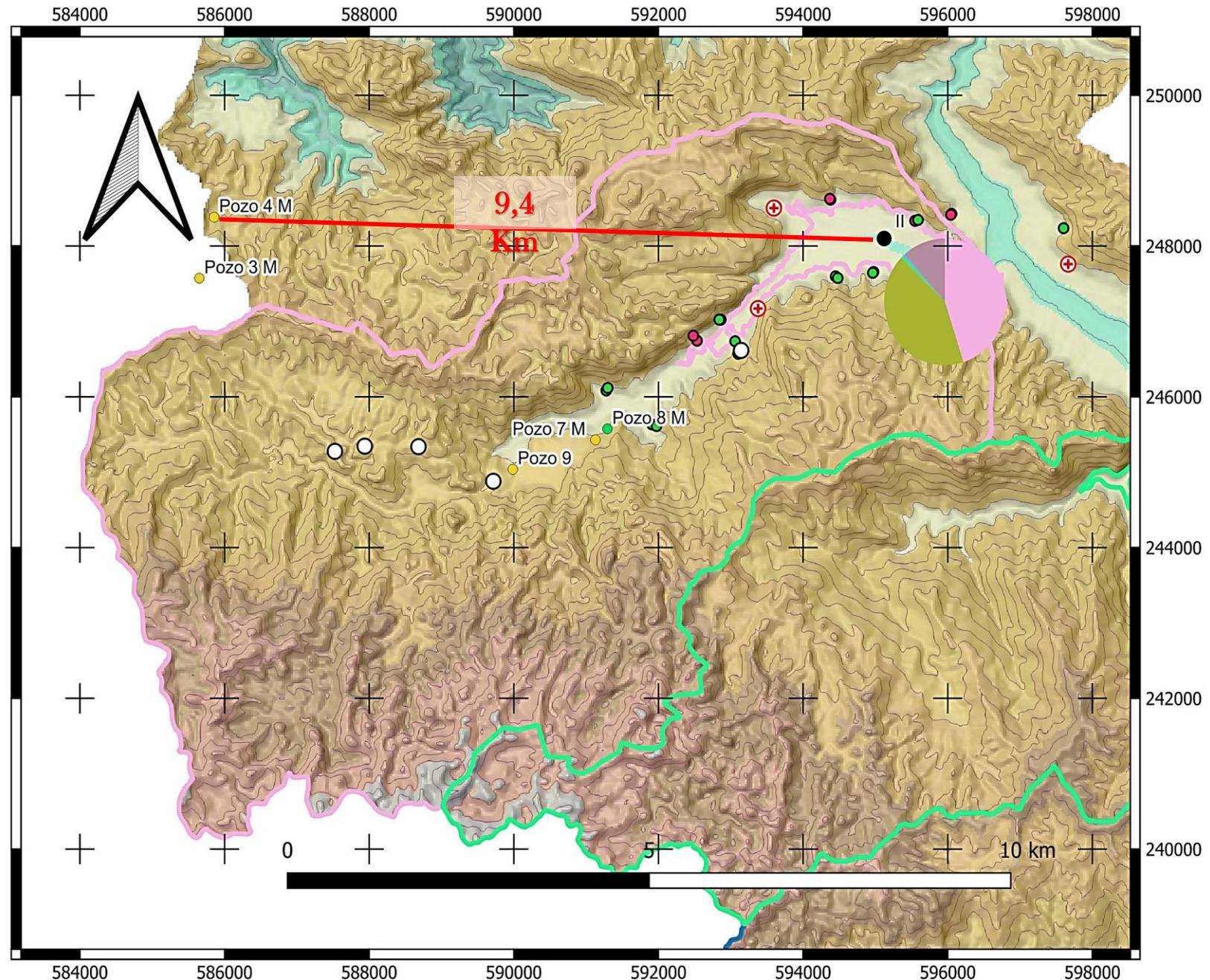
- APORTES**
- Fuente S1 (Forestal)=50%
 - Fuente S2 (Cultivos varios)=40%
 - Fuente S3 (Café)=10%
- Bondad de ajuste **0.909**

- APORTES**
- Fuente S1 (Forestal)=50%
 - Fuente S2 (Café)=40%
 - Fuente S3 (Frutales)=10%
- Bondad de ajuste **0.86**



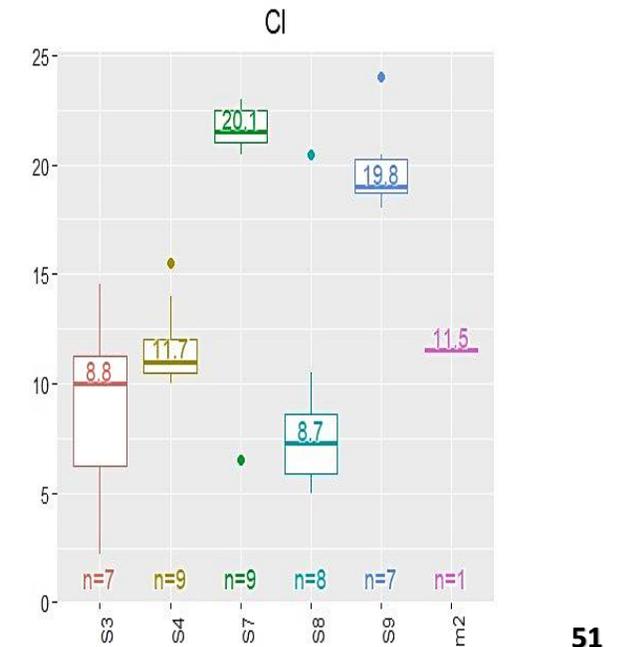
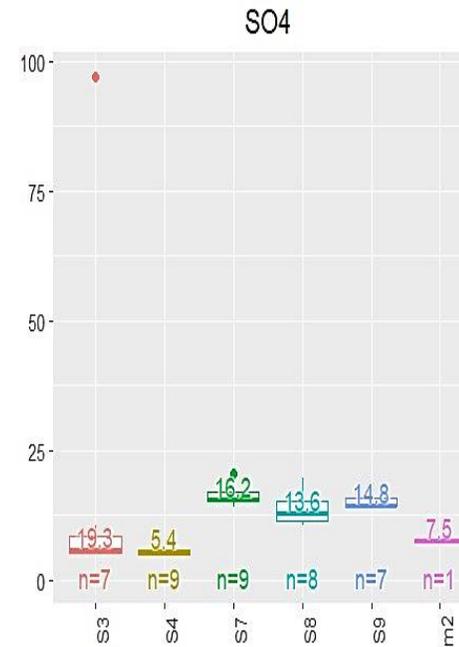
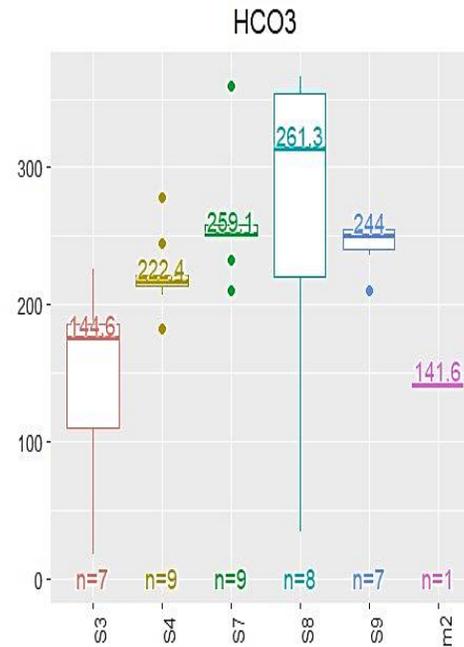
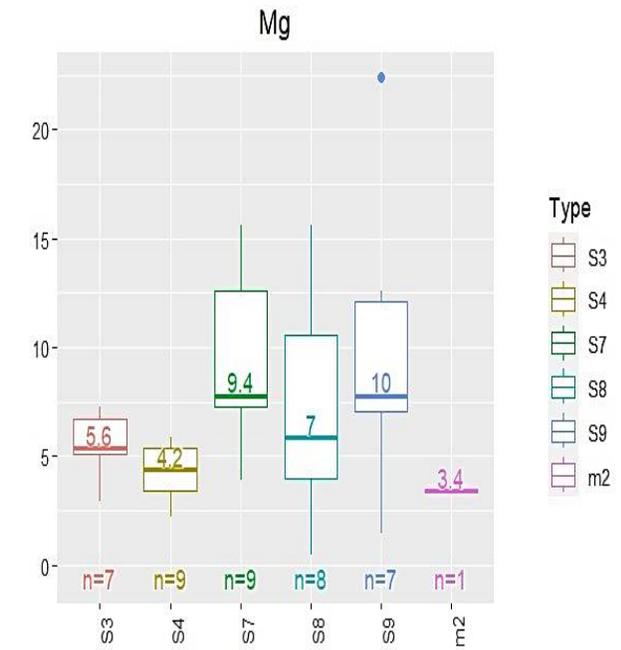
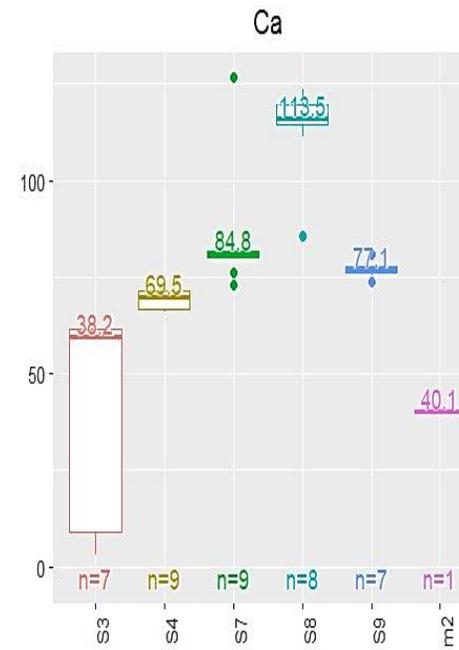
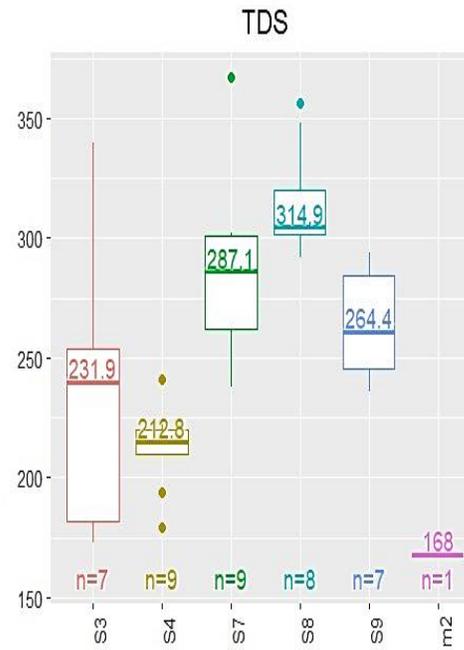
Aplicación FingerPro Pozos

- La aplicación integrada de las técnicas nucleares permite explorar la incorporación de las herramientas FingerPrint al estudio hidrogeológico del área para el análisis de las mezclas.
- Se analizaron los aportes hídricos dentro de la subcuenca de los pozos 3, 4, 7, 8 y 9 como posibles fuentes. La muestra de la mezcla se tomó en el punto II (descarga del sector de subcuenca Río Hanabanilla).
- Se empleó la herramienta FingerPro, como trazadores; los macro-componentes del agua, datos físico-químicos y los valores de los isótopos medidos.



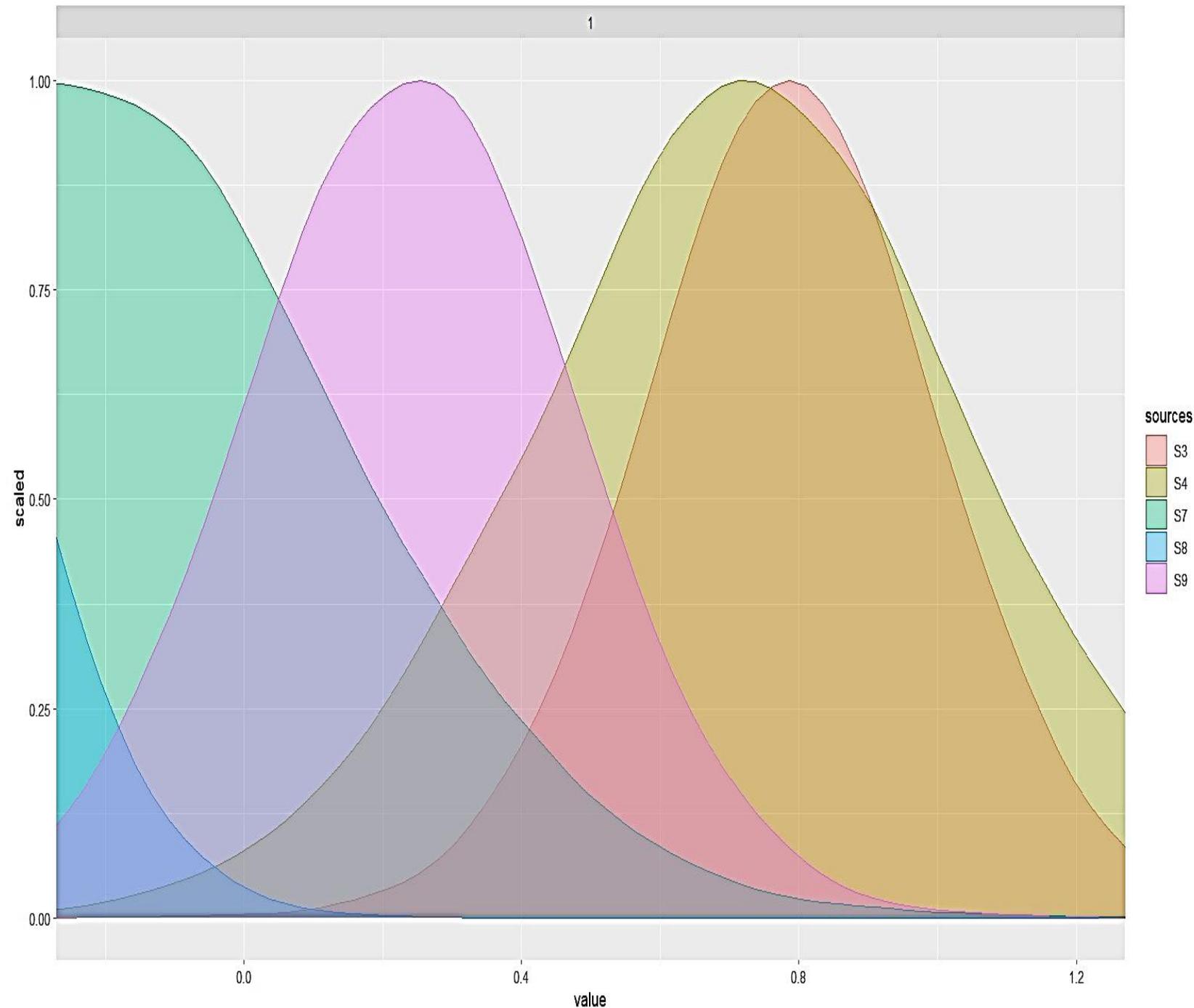
Resultados FingerPro (Integración con Pozos)

- Los gráficos de caja evalúan el comportamiento de los rangos de los trazadores de cada fuente en relación con la mezcla evaluada (Punto II).
- La prueba de rango eliminó las variables CE y TDS que no cumplen los criterios.
- Se mantienen las variables en el análisis (TDS, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄, pH, Temp, ¹⁸O, Deuterio, d-exceso).
- El índice de conservatividad listó x orden de prioridad las variables:
1 Cl 98.95, 2 d-exceso 94.75, 3 SO₄ 90.65, 4 Temp 87.95, 5 Mg 72.70, 6 67.10.

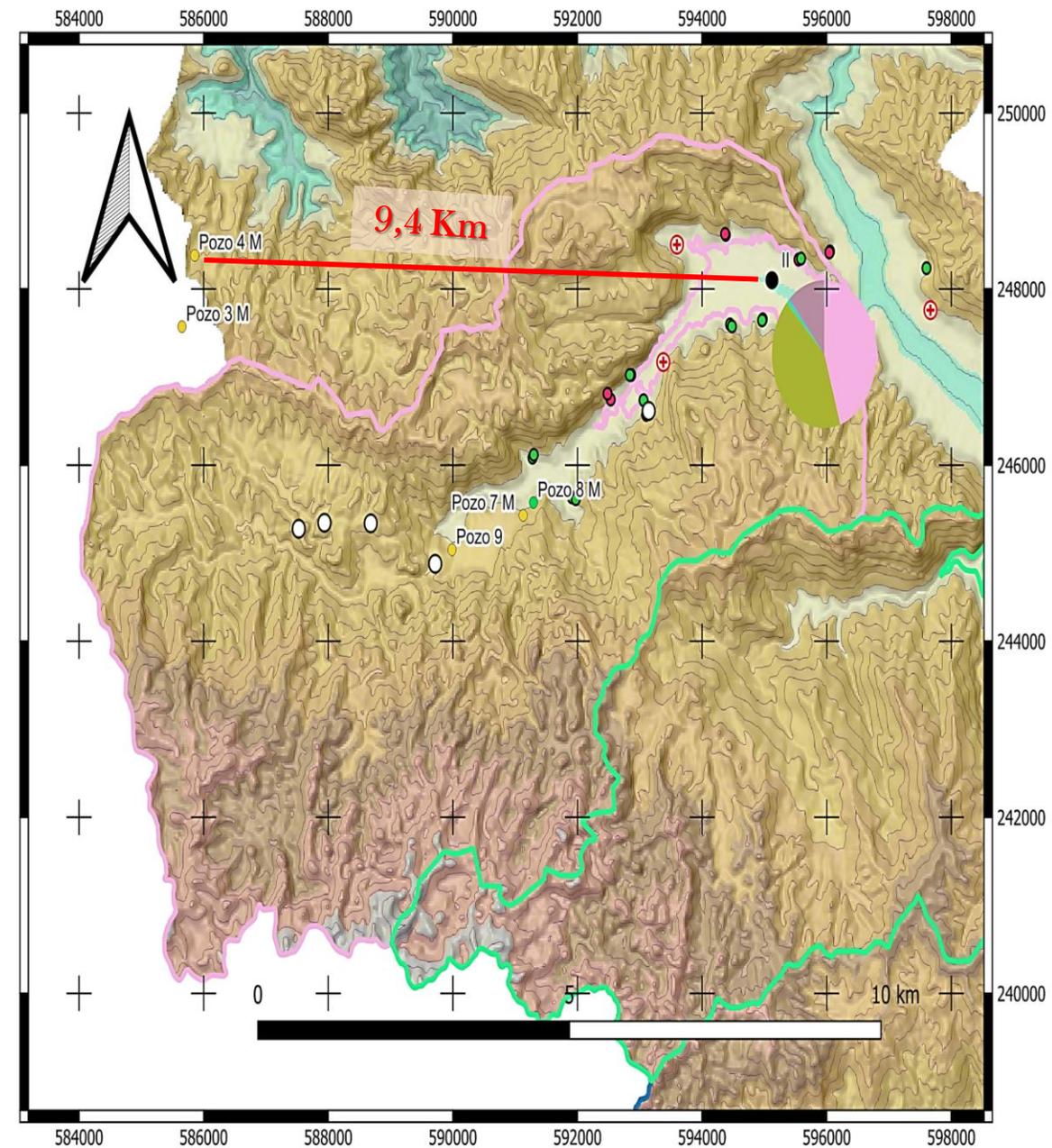
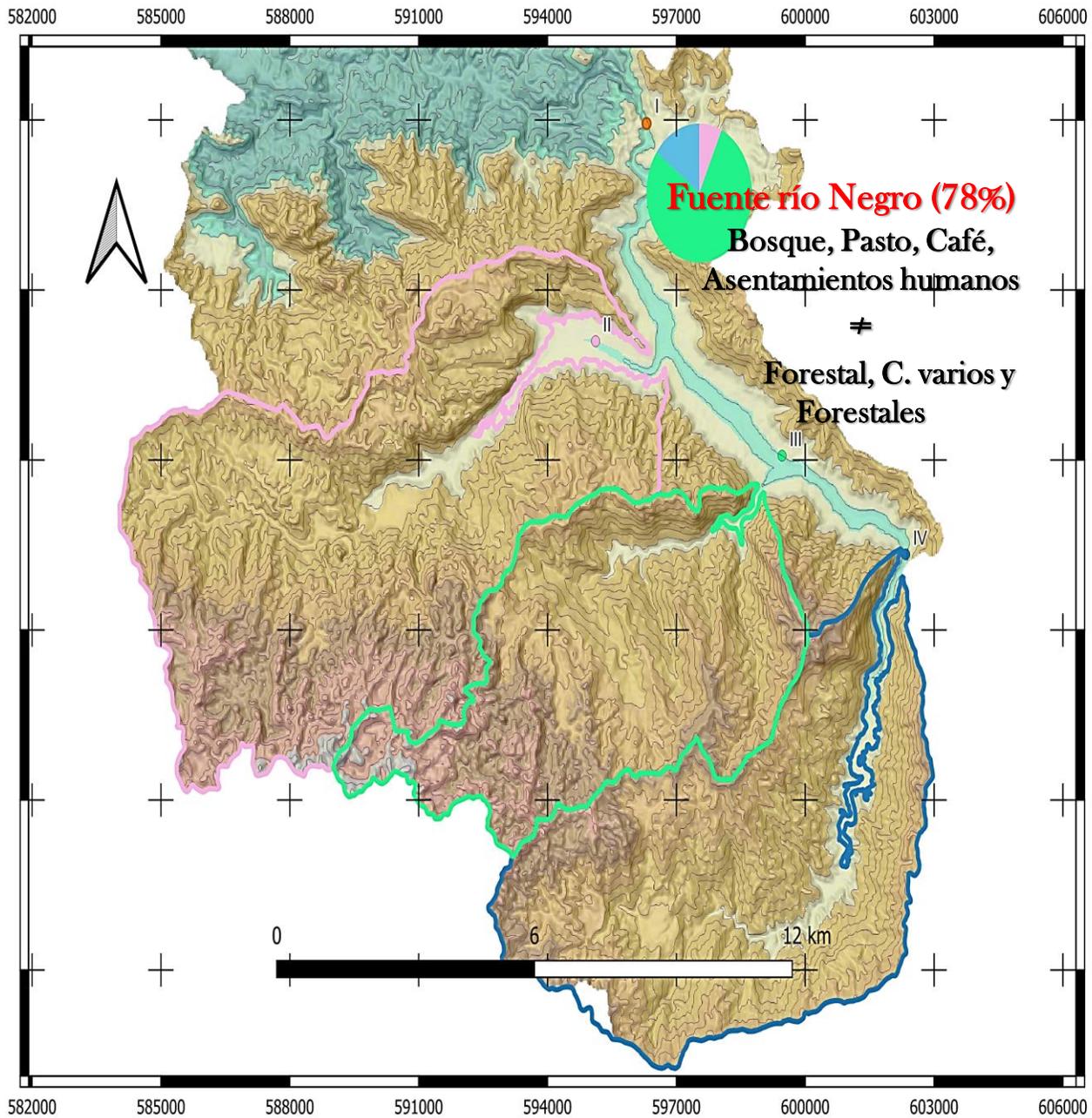


Resultados FingerPro (Integración con Pozos)

- Se identifican los diferentes aportes asociados al agua subterránea a las aguas en el punto de descarga del sector Hanabanilla. Los pozos de mayor aporte cercano a los 75% son los pozos 3 y 4 (a más de 9 Km) y el pozo 9 en un 25 %
- La bondad de ajuste fue de **0.89**.



Aplicación integración de las Técnicas nucleares



CONCLUSIONES:

- 1- Los resultados demuestran que los fenómenos de degradación por erosión y sedimentación del suelo, ocurren como procesos dinámicos en el paisaje y solo una caracterización integrada permite obtener los resultados más cercanos a la realidad de la anomalía estudiada.
- 2- El estudio muestra que la aplicación individual de Técnicas nucleares, evalúan fenómenos de degradaciones del agua y el suelo abordando sus impactos y causas, solo en atención al problema que cada una analiza.
- 3- Se muestra una real aplicación integrada y secuencial de estas Técnicas, obteniendo la cuantía y redistribución del suelo erosionado, los reales aportes del suelo depositado, esclareciendo las causas y origen del transporte de sedimentos y valorando sus reales impactos en los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Uso de las técnicas nucleares (FRN-CSSI-Hidrología isotópica) para evaluar impactos de la sedimentación en el Embalse Hanabanilla



Hidrología isotópica

