

Este documento forma parte del proyecto de la Universidad de Salamanca: MTM2016-80539-C2-2-R - DISEÑO ÓPTIMO DE EXPERIMENTOS APLICADO A LA SALUD Y A LA INVESTIGACION EN SEGURIDAD (DOSIS)

---

## Manual de uso de BIOKMOD WEB (Aplicación a los modelos OIR). Rev 2

Guillermo Sánchez. 2021-12-18  
<http://diarium.usal.es/guillermo>

### ■ Introducción

BIOKMODWEB es una aplicación web orientado a la modelización, particularmente a la modelización compartimental y a su aplicación a dosimetría interna.

- Se ejecuta en web: <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/> *online*, ([importante en cualquier programa actual](#)) y puede utilizar cualquier dispositivo (computadora, tableta ) que disponga de navegador.
- Los cálculos pueden ser realizados en un solo paso, utilizando una única pantalla.
- El usuario puede construir sus propios modelos, el programa genera la ecuaciones y las resuelve.
- Permite obtener, cuando matemáticamente es posible, soluciones analíticas.
- Dispone de los modelos de la ICRP 78/68 y algunos ( como es el del Uranio) de los *Occupational Intakes of Radionuclides (OIR) biokinetic models of ICRP*.
- Incluye incorporaciones irregulares y alectorias que normalmente representan con mas realistas las exposiciones ocupacionales a partículas radiactivas
- Para los trabajadores ocupacionalmente expuestos a inhalaciones de oxido de uranio sometidos a analisis de U en orina dispone de utilidades expecificas (p.ej:permite tratar el historial completo del trabajador si se dispone de datos diarios de tomamuestras).
- Tiene herramienta auxiliares (e.g. Simulador, acceso a bases de datos con la informacion mas reciente, muestreo optimo, modelos fisiologicos, etc)

Se dispone de un manual completo de BIOKMOD. En este manual vamos a referirnos exclusivamente a las opciones de MENU ICRP 130/134/137 models y a Inhalación UO2/U3O8 que corresponde a las opciones de menú:.

<http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/> -> **ICRP 130/134/137 Models** y **Inhalation UO2/U3O8** (especifico para inhalaciones de UO2 y bioensayos de orina)

Las entradas y los resultados puedes imprimirlos directamente desde el navegador. Se recomienda instales el complemento que permite generar salidas pdf.

Puede ejecutarse desde un ordenador o desde una tableta, También desde móvil pero quizás no es practico por el tamaño).

Here is the BIOKMODWEB site. It can be used for solving yourself compartmental models or to make use of the ICRP biokinetic models (including the new ICRP 130/134/137 models). It can be applied in internal dosimetry, bioassay evaluations, nuclear medicine, pharmacokinetic, and more. It have been developed using the Wolfram Language [Mathematica](#), [webMathematica](#)

Powered by  
**WOLFRAM WEB MATHEMATICA™**  
and [Java](#).

**BIOKMODWEB** uses the [Mathematica](#) toolbox: **BIOKMOD**. The most usual features of BIOKMOD are available here (use the left side menu). It runs entirely within your web browser.

What things you can do with BIOKMOD?

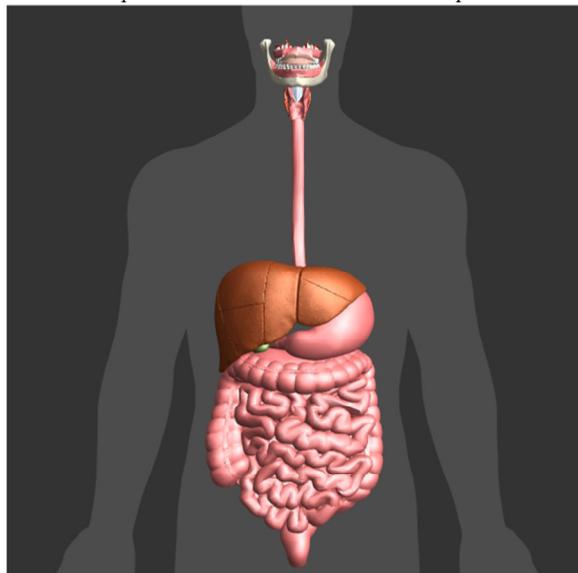
It can be used to solve systems of differential equations, to fit coefficients, convolution, and more, with application for modeling Linear and Nonlinear Biokinetic Systems. Most of the ICRP biokinetic models are included and they can be applied in internal dosimetry and bioassay evaluations.

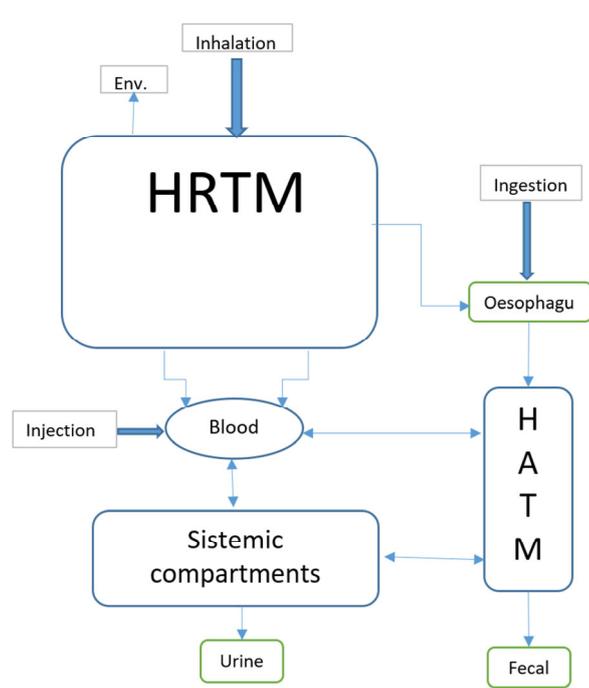
- (i) The user can build and solve its own compartmental model (constant and variable coefficients can be used).
- (ii) All ICRP30/66/78 are solved for most isotopes (including some specific options for Lung and Respiratory Tract) obtaining the Intake Retention Fractions (IRF), their analytical expressions (intake retention functions), the compartmental contents and the graphic representations. Acute, constant -chronic, continuous (variable in the time) and multi-inputs, even random, intakes can be used. One can accept the default parameters or introduce specific values. They can be used for bioassay evaluations and for research and education purposes.
- (iii) (New) The new ICRP 130/134/137 models for Co, I, Cs and U have been added in an additional package, which can be applied for bioassay evaluations.
- (iv) An optimal design function is included. It can be used to establish the best moment for experimental sample or bioassay.
- (v) Fitting functions for non linear fitting.
- (vi) A function for evaluating uncertainties analytically.

---

## MODELO CONCEPTUAL ICRP/OIR

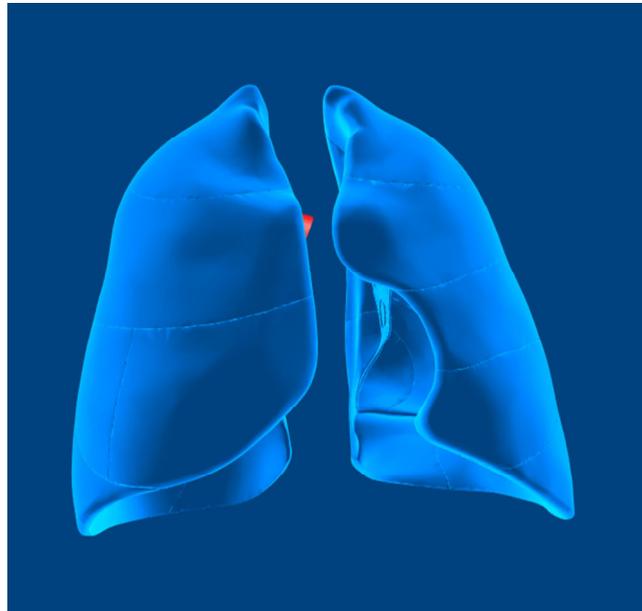
Los modelos OIR (ICRP130/134/137/141) dividen el cuerpo humano en subsistemas: el modelo de vías respiratorias (HRTM), el modelo del tracto alimentario (HATM), y subsistema específicos para el resto de los compartimentos (“Compartimentos sistémicos”). HRTM es aplicable para todos los elementos, excepto H. Este modelo solo se tiene en cuenta cuando la ingesta se produce por inhalación. El HRTM se describe en ICRP130 (2015). El HATM (ICRP100, 2006) también es aplicable para todos los elementos, aunque cada elemento tiene características específicas. Los compartimentos sistémicos suelen ser específicos de cada elemento.

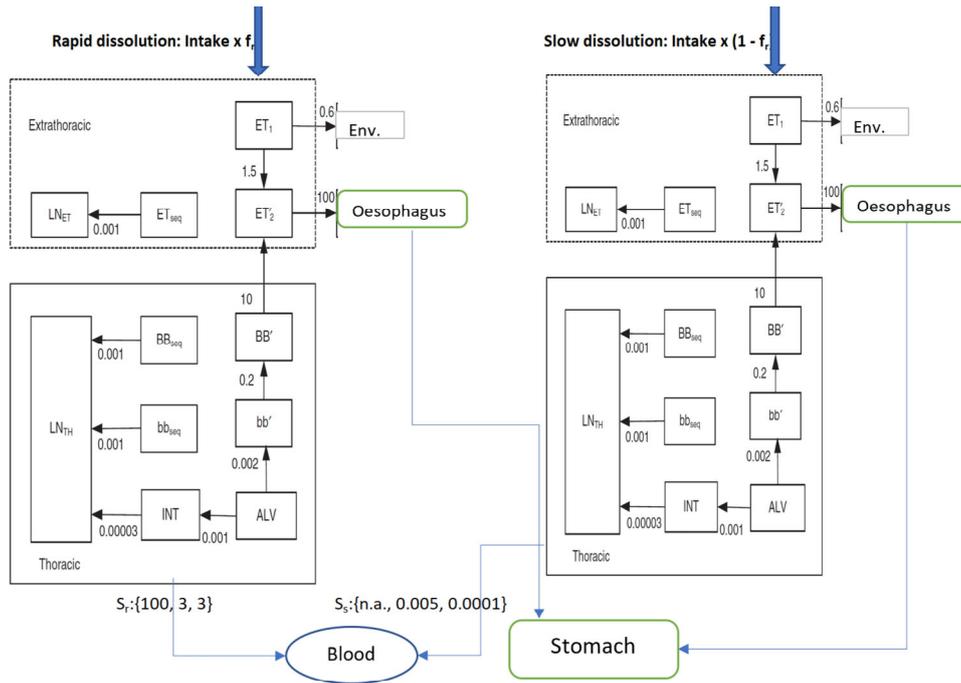




## HRTM (ICRP 130)

Los modelos OIR para las incorporaciones por inhalación utiliza como modelo del tracto respiratorio (ICRP 130) el que se muestra en el diagrama de abajo (que reemplaza al de la ICRP 66)





El modelo de vías respiratorias (HRTM) según ICRP 130 (reemplaza el modelo ICRP 66) para una ingesta por inhalación que muestra la conexión de las vías respiratorias con el tracto digestivo (Estómago) y el modelo sistémico (Sangre). El HRTM se divide en dos regiones: la extratorácica y la torácica. Por conveniencia matemática también se divide en dos sistemas idénticos. Una fracción  $f_r$  de la ingesta de partículas, con un comportamiento de disolución rápida, se deposita en el sistema representado en el lado izquierdo del figura y el resto en el derecho. El valor de  $f_r$  depende de la forma química de los aerosoles radiactivos que se toman. Se consideran tres tipos básicos de metabolismo (Rápido (F), Medio (M) y Lento (S)) aunque en el ICRP 130 se ha agregado a tipos adicionales para algunos componen. En la figura se indican los valores que por defecto corresponden respectivamente al tipo de metabolismo: {F, M o S}. Para algunos elementos, caso del uranio, se dispone de valores específicos para distintas especies químicas.

El proceso que siguen los aerosoles inhalados es el siguiente: Después de la inhalación, una fracción del contaminante se deposita en las regiones del tracto respiratorio desde donde puede llegar a la sangre y al resto del cuerpo. La cantidad de material depositado en cada región depende principalmente del tamaño de partícula del material inhalado, que está representado por el Diámetro Aerodinámico Mediano de Actividad (AMAD). Dos mecanismos son los responsables de la eliminación de las partículas depositadas: el transporte de material a otras regiones y la absorción a la sangre. Se considera que las velocidades de transporte de partículas son las mismas para todos los materiales e independientes de la edad y el sexo. La absorción en la sangre depende de la forma física y química del material depositado y ocurre en todos los compartimentos excepto en la nariz anterior, ET<sub>1</sub>. El proceso de absorción ha sido representado matemáticamente por dos subsistemas: uno para la fracción  $f_r$  que se disuelve rápidamente (a una velocidad  $s_r$  y otra para la parte restante que se disuelve lentamente (a una velocidad  $s_s$ ,  $s_r$  y  $s_s$  representan la tasa de transferencia de cada compartimento desde la región torácica hacia la sangre. Cuando  $f_r = 1$  (tipo F) solo se considera el subsistema de disolución rápida. Cuando el elemento en lugar de la partícula se ingiere en forma de gas, normalmente se dispone de valores específicos.

Nota: En el la programación del modelo en BIOKMOD surgió la duda si  $f_r$  siempre era 1 para ET<sub>1</sub> en el subsistema de dilución rápida y se precindidía del compartimento en el subsistema de dilución lenta (108)... "It is assumed that no absorption takes place from ET<sub>1</sub>, but if the model in Fig. 3.5(a) is used, the ET<sub>1</sub> deposits still has to be partitioned between fast and slow compartment because material is cleared from ET<sub>1</sub> to ET<sub>2</sub>" Correo: 25 jul 2020, 11:06

Debajo se muestra la numeración de los compartimentos, los compartimentos en los que hay deposición inicial y los factores de deposición para AMAD 5 (este es el utilizado por defecto, pero pueden elegirse otros AMAD, incluso la opción gases, dependiendo del elemento elegido)

Out{=}/TableForm=

ALV	bb'	bbseq	BB'	BBseq	ET2'	ETseq	ET1	LN <sub>ET</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ALV	bb'	bbseq	BB'	BBseq	ET2'	ETseq	ET1	0
0.05319	0.01110079	0.00002206	0.0177345	0.00003554	0.257684	0.0005164	0.4795	0

- Coeficientes de transferencia (ks:  $s_r$  disolución rápida &  $s_s$  disolución lenta).

Out[ ]/TableForm=

From	To	keff(day <sup>-1</sup> )
1	2	0.002
1	10	0.001
2	4	0.2
3	11	0.001
4	6	10
5	11	0.001
6	13	100
7	9	0.001
8	14	0.6
8	6	1.5
10	11	0.00003
1	12	ks
2	12	ks
3	12	ks
4	12	ks
5	12	ks
6	12	ks
7	12	ks
9	12	ks
10	12	ks
11	12	ks

## Co, Cs, I o U models

En el menú **ICRP 130/134/137 models** elije uno de los elementos: Co, Cs, I o U . El menú que se desplegará es similar al de abajo para el elemento que hayas elegido (puede contener pequeños cambios respecto a lo que se muestra debajo):

### NEW CAESIUM MODEL

(Updated: 2019-05-19. Beta version to test. Comments to: guillermo2046(at)gmail.com).

Caesium ICRP model according to ICRP 130 and ICRP 137.

Different intake pathways can be selected by the user and different kind of intakes (acute or chronic). If chronic intake is chosen then the last day of exposure should be indicated and after this date it is assumed that the intake ceases.

Four kind of reports can be selected: BioassayReport, GraphicsReport, CompartmentContents and ResponseFunction.

The decay constant of the corresponding isotope must be entered, directly the value expressed in days<sup>-1</sup> (e.g 0.000062909 for Cs-137) or as an expression (e.g:  $\text{Log}[2]/(30.167 \cdot 365.242)$ ).

The recommended parameter values for Cs (ICRP 137) are:

For inhalation: {fA, fr, sr, ss}; F = {0.99, 1, 100, "N.A."}; M = {0.2, 0.2, 3, 0.005}; S = {0.01, 0.01, 3, 0.0001}

For ingestion: fA=0.99 (for soluble forms); fA=0.1 (for insoluble forms)

For injection: fA=0.99

Other parameter values instead of the recommended ones could be entered.

Intake pathway: --- ▾

Intake type: --- ▾

Report type: --- ▾

Disintegration constant (in days<sup>-1</sup>): 0.000062909

fA (for Ingestion): 0.99

Period of chronic intake (in days), it is applied when it has been chosen as intake type: constant: 10000

Days to computed the IRF (additional to the include by default)-at least two values are required- or for GraphicsReport interval represented (in this case the values min and max are used): {11, 101, 1001}

The following parameters are required for inhalation.

AMAD: 5 ▾ Select CLASS: --- ▾ (By default) Or {fA, fr, sr, ss}

Push EVALUATE, wait a few seconds (until 60 d).

Evaluate

Opciones:

- **Intake pathway** (Tipo de incorporación): Inhalation, Ingestion, Injection
- **Intake type**: Acute o Constant (Chronic). El caso constante permite estudiar el caso en el que el individuo esta expuesto de forma indefinida a una exposición constante o por un numero de días d, que se cumplimentará mas adelante, a partir del cual cesa la incorporación.

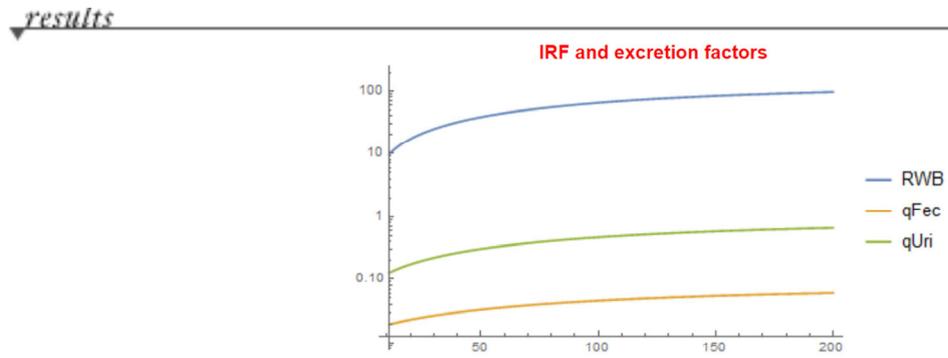
- **Report type:** BiossayReport, GraphicsReport, CompartmentContent, ResponseFunction. Normalmente los bioensayos son WB, Fec24h y Urine 24h pero, en el caso del U también se muestra la retención pulmonar y el caso del Iodo la retención en Tiroides. En CompartmentContent que no se muestra la retención en cada compartimento y ResponseFunction es la función de respuesta en expresión analítica (muestra todos los términos pero en la practica para mas de 1 día normalmente afectan solo 4 o 5)
- **Disintegration or decay constant** (in days<sup>-1</sup>). Utilícese la específica del isótopo, si se parte del valor en años u otra unidad pueden hacerse las operaciones en la misma ventana donde se introducen los datos de entrada. Por ej: Si para el Cs 137 se tiene que el periodo de semidesintegración es 30.167 años, entonces la cte de decaimiento será:  $\text{Log}[2]/(30.167*365.242)$ , que puede escribirse directamente (ojo: Log es e logaritmo neperiano, el argumento va entre corchetes)
- **fA** (for ingestion) aqui va le valor específico de ingestión que no lo usara el programa si la vía es inhalación, en ese caso el valor va asociado al tipo o clase de metabolismo.
- **Period of chronic intake.** Se indicará los días que desde t=0 el individuo esta expuesto a una incorporación constante del isótopo. Este valor se usara si la persona esta expuesta por un tiempo continuado.
- **Days to compute IRF.**- Los IRF son calculados para una serie de días por defecto, pero si se tiene necesidad incluir mas días puede hacerse aquí, de hecho deben añadirse al menos dos días. Esta información también se usa para definir el limite superior e inferior del gráfico, si se elije GraphicsReport en Report type.
- **AMAD y CLASS** aplican si se elige como vía de incorporación **Inhalation**. Cuando se elije CLASS de un tipo concreto, por ejemplo M, el programa utiliza los valores de  $f_A, f_r, s_r$  y  $s_s$  asociado a ese tipo de metabolización, el usuario tiene la opción de introducir valores no estándar.

▫ **Salida**

Dependerá del tipo de salida que hayas elegido en Report type y del elemento (debajo se muestran dos ejemplos). Las tablas pueden copiarse en una hoja de cálculo y operar con ellas. Por ejemplo: Si los IRF corresponden a Cs-137 y quieren expresarse en Ba-137m se pasa a una hoja de calculo y se multiplica todo por el rendimiento del Cs-137 al desintegrarse a Ba-137-m (normalmente se usa 0.94).

**IRF and excretion factors**

days	Wb	Fec24h	Urine24h
1	0.947902	0.0023105	0.0491605
2	0.927822	0.0037057	0.0158046
3	0.913389	0.00279166	0.0111999
4	0.902077	0.00194657	0.00901598
5	0.89253	0.00147234	0.00778374
6	0.884036	0.00121888	0.00702204
7	0.876209	0.00107439	0.00652281
8	0.868829	0.00098514	0.0061806
9	0.861762	0.000926263	0.00593633
10	0.854925	0.000885337	0.00575493



## Evaluación de BIOENSAYOS

Puedes evaluar de forma sencilla los resultados de bioensayos. Tienes 3 opciones: Bioassay Fit (Bioensayo simple, es decir solo dispone de un tipo de bioensayo), Bioassay Multifit (para el caso que tengas muestras de dos tipos de bioensayos), U fit (caso personalizado para personas expuestas de forma rutinaria a UO2 y se le tomen medidas de excreción urinaria de 24h). Vamos a mostrar cada caso con un ejemplo basado en casos reales. Los Factores de Conversión a Dosis que apliquen los puedes obtener de ICRP Data viewer que se puede descargar desde el menú.

■ **Bioassay Fit**

Si en el menú elegimos: Bioassay fit (o escribimos directamente <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit2.jsp>) aparece el menu de abajo:

Worker data: "Pepe Garcia Sanchez"

Case description:  
"Ingestion of Cs 137 during about 500 days taken with a whole body control"

Select Element: **Caesium** Pathway: **Inhalation** Intake type: **Constant** Time of exposure for chronic intake (in days): (if constant intake is selected): 450  
Decay constant (in days<sup>-1</sup>): **Cs137** Or 0.0

In case of ingestion (fA for ingestion): 0.99

In case of inhalation select:  
**AMAD5** CLASS: **CaesiumF** Or (fA, fr, sr, ss)

Bioassay: **WholeBody**  
Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t2, m2, s2}, ...}, being ti=time, mi=measurement(Bq), si=uncertainty (\*)  
{ {39, 300, 100}, {58, 671, 100}, {75, 737, 100},  
{130, 1661, 100}, {156, 1846, 100}, {170, 1882, 100}, {198, 2247, 100},  
{234, 2493, 100}, {263, 2926, 100}, {297, 3224, 100}, {325, 3608, 100}, {374,  
3883, 100}, {408, 3773, 100},  
{432, 3723, 100}, {494, 3195, 100}, {520, 2740, 100}, {556, 2469, 100}, {592,  
2375, 100}, {625, 1954, 100},  
{602, 1614, 100}, {744, 1221, 100}, {800, 1174, 100}, {800, 739, 100}}

Scattering factor B: 1.70  
Dose coefficient e(50) (mSv/Bq): **Cs-137, Ingestion, all unspecified compounds, fA=0.99** Or  
0.0   
LimitPlot: {min, max}: {100, 1000}

Deberemos completarlo, eligiendo Element, Intake pathway; Intake type, el valor de "decay constant" en days<sup>-1</sup>, el valor de fA, si es ingestión, que aplique, el tiempo de exposición constante (este valor no se usa si hemos elegido acute intake).

Si es inhalación hay elegir el AMAD y la Clase o tipo de metabolismo apropiada al elemento y a la forma química en la que se inhala, es decir los factyores de absorción fA, fr, sr, ss. Permite elegir entre los siguientes:

CaesiumF = {0.99, 1, 100, "N.A."};

CaesiumM = {0.2, 0.2, 3, 0.005};

CaesiumS = {0.01, 0.01, 3, 0.0001};

CobaltF = {0.1, 1, 1, "N.A."};

CobaltM = {0.02, 0.2, 1, 0.005};

CobaltS = {0.001, 0.01, 1, 0.0001};

IodineF = {0.99, 1, 100, "N.A."};

IodineM = {0.2, 0.2, 3, 0.005};

IodineS = {0.01, 0.01, 3, 0.0001};

UraniumF = {0.02, 1, 10, "N.A."};

UraniumM = {0.004, 0.2, 3, 0.005};

UraniumS = {0.0002, 0.01, 3, 0.0001};

UraniumFM = {0.016, 0.8, 1, 0.01};

UraniumMS = {0.0006, 0.03, 1, 0.0005};

O introducir otros valores

A continuación hemos del elegir el tipo de bioensayo que se le ha realizado el individuo y completar la cajita que va debajo con los resultados de los bioensayos según formato: {{t1, m1, s1},...} donde:

t1 es el tiempo transcurrido en días desde que se produjo la incorporación (si es acute input) o desde que el individuo empezó a estar expuesto.

m es el resultado de la medida, lo mejor es usar Bq si es medidas WB o CRC y Bq/d si es excreción urinaria o fecal, si se emplea otra unidad habrá que tener en cuenta que el resultado estará referido a la unidad de entrada empleada) y su correspondiente incertidumbre (normalmente calculada con 1 sig, si se usan 2 s en ese caso el resultado también nos vendrá expresado con 2 s)

SFB es el factor de scattering B (típicamente la desviación en estándar geométrica). si este ya está incorporado en s, escríbase 1 y en ese caso no se tendrá en cuenta.

DCF es el factor de conversión a dosis aplicable a cada Bq incorporado (naturalmente está asociado a la vía de incorporación, el tipo de metabolismo, etc.) que se puede obtener de OIR (ICRP134/137) data viewer.

LimitPlot es el intervalo que el que queremos que se nos muestre la función teórica de ajuste obtenida y las determinaciones realizadas {{t1, m1, s1}, ...}. El programa usara todos los valores introducidos y no solo los del intervalo representado

#### ■ Caso U

Un trabajador ha estado expuesto de forma constante a aerosoles de UO<sub>2</sub> (tipo S/M) y AMAD 5. Se supone que durante todo ese tiempo ha estado trabajando en el mismo puesto de trabajo y las condiciones medias de exposición pueden considerarse aproximadamente constantes. Se le han realizado las siguientes determinaciones en muestras de orina de 24 h que se han tomado en días laborables (es decir que no han existido tiempos sin exposición entre la exposición y la toma de la muestra): {d, U-234, sd}: {{10765, 1.48 10<sup>-2</sup>, 1.29 10<sup>-3</sup>}, {10989, 1.22 10<sup>-2</sup>, 9.40 10<sup>-4</sup>}, {11211, 8.14 10<sup>-3</sup>, 7.8 10<sup>-4</sup>}, {11423, 1.63 10<sup>-2</sup>, 1.24 10<sup>-3</sup>}, {11709, 8.24 10<sup>-3</sup>, 7.60 10<sup>-4</sup>}, {11892, 1.21 10<sup>-2</sup>, 1.85 10<sup>-3</sup>}, {12065, 7.53 10<sup>-3</sup>, 7.30 10<sup>-4</sup>}}. Considérese para orina 24 h SF<sub>B</sub> = 1.7. y que el FCD es 5.4 10<sup>-3</sup>

10<sup>-3</sup> Bq/mSv)

▫ **Entrada**

Personal data: "Pepe Garcia Sanchez"

Free description:  
 Radiation"

Isotope Element: Uranium Pathway: Inhalation Intake type: Constant Time of exposure for chronic intake (in days): (if constant is selected): 15000  
 Decay constant (in days<sup>-1</sup>): U Or 0.0

Dose of ingestion (fA for ingestion): 0.99

Dose of inhalation select:  
 IAD5 CLASS: UraniumMS Or {fA, fr, sr, ss}

Bioassay: Urine  
 Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t2, m2, s2}, ...}, being ti=time, mi=measurement(Bq), si=uncertainty (\*)  
 {765, 1.48 10<sup>-2</sup>, 1.29 10<sup>-3</sup>}, {10989, 1.22 10<sup>-2</sup>, 9.40 10<sup>-4</sup>}, {11211, 8.14 10<sup>-3</sup>, 7.8 10<sup>-4</sup>}, {11423, 1.63 10<sup>-2</sup>, 1.24 10<sup>-3</sup>}, {11709, 8.24 10<sup>-3</sup>, 7.60 10<sup>-4</sup>}, {1392, 1.21 10<sup>-2</sup>, 1.85 10<sup>-3</sup>}, {12065, 7.53 10<sup>-3</sup>, 7.30 10<sup>-4</sup>}

Scattering factor B: 1.70

Dose coefficient e(50) (mSv/Bq): U-238, Inhalation, Aerosols Type M/S: fA=6E-4, 5 Åµm Or 5.4 \*10<sup>(-3)</sup>  
 Plot: {min, max}: {10000, 12500}

▫ **Salida**

**Dosimetry report**

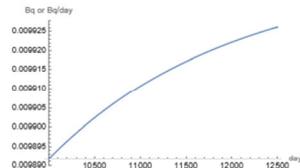
**Input data**

Name -> Pepe Garcia Sanchez
Description -> Inhalation
Uranium
Decay constant -> 0
Pathway -> Inhalation
Type of intake -> Constant
{fA, fr, sr, ss} -> {0.0006, 0.03, 1, 0.0005}
Bioassay -> Urine
Scattering B-factor -> 1.7
Dose coefficient e(50) (mSv/Bq) -> 0.0048

**Estimated intake and E(50) doses by fitting**

I (Bq or Bq/day) Sd-method -> 0.413075	sd -> 0.0147952	Chi2 -> 0.878783	I (Bq or Bq/day) using ML -> 0.453183	Chi2 ML -> 2.00391	P-value MV -> 0.919339
Using I(Sd-method):>	Total Intake (Bq):>	6196.12*Bq	E(50):>	29.7414*mSv	
Using I (ML-method):>	Total Intake (Bq):>	6797.74*Bq	E(50):>	32.6292*mSv	

I is the intake (in Bq for an acute intake) or the daily intake (Bq/d for a chronic intake) computed using a the Sd-Method (the sample uncertainties are assumed normal) and the ML(maximum likelihood) method.



■ **Caso Cs 137**

A una persona que ha estado expuesta a ingestión de Cs 137 un tiempo desconocido, los resultados medidos con un contador WB han sido: {días desde el inicio de la exposición, Bq Cs-137}  
 {39,300}, {58,671}, {75,737}, {130,1661}, {156,1846}, {170,1882}, {198,2247}, {234,2493}, {263,2926}, {297,3224}, {325,3608}, {374,3883}, {408,3773}, {432,3723}, {494,3195}, {520,2740}, {556,2469}, {592,2375}, {625,1954}, {682,1614}, {744,1221}, {800,1174}, {880,739}

Asumase una incertidumbre 1 sig = 100 Bq Cs-137 en todas las medidas y un SG = 1.7. [Obsérvese que estos valores son los introducidos por defecto en la entrada por lo que pueden dejarse los que hay]

□ **Entrada**

amount 550 days that gives as solution about 27 Bq/day. Then the total intake will be 27 Bq/day x 550 days.

Worker data: "Pepe Garcia Sanchez"

Dose description: "Ingestion of Cs 137 during about 550 days taken with a whole body control"

Select Element: Caesium Pathway: Ingestion Intake type: Constant Time of exposure for chronic intake (in days): (if constant intake is selected): 550

Decay constant (in days<sup>-1</sup>): Cs137 0.0

In case of ingestion (fA for ingestion): 0.99

Bioassay: WholeBody

Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t2, m2, s2}, ...}, being ti=time, mi=measurement(Bq), si=uncertainty (\*)

```
{39, 300, 100}, {58, 671, 100}, {75, 737, 100},
{130, 1661, 100}, {156, 1846, 100}, {170, 1882, 100}, {198, 2247, 100},
{234, 2493, 100}, {263, 2926, 100}, {297, 3224, 100}, {325, 3608, 100}, {374, 3883,
100}, {408, 3773, 100},
{432, 3723, 100}, {494, 3195, 100}, {520, 2740, 100}, {556, 2469, 100}, {592, 2375,
100}, {625, 1954, 100},
{682, 1614, 100}, {744, 1221, 100}, {800, 1174, 100}, {880, 739, 100}}
```

Scattering factor B: 1.70

Dose coefficient e(50) (mSv/Bq): Cs137, Ingestion, all unspecified compounds, fA=0.99 0.0

LimitPlot: {min, max}: {100, 1000}

□ **Resultados**

**Dosimetry report**

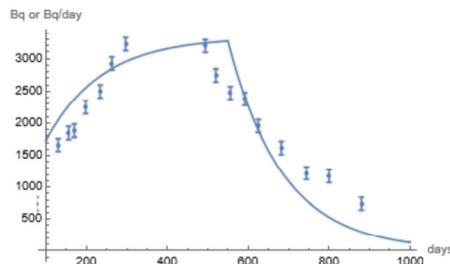
Input data

Name -> Pepe Garcia Sanchez
Description -> Ingestion of Cs 137 during about 550 days taken with a whole body control
Caesium
Decay constant -> 0.000063133
Pathway -> Ingestion
Type of intake -> Constant
fA -> 0.99
Bioassay -> WholeBody
Scattering B-factor -> 1.7
Dose coefficient e(50) (mSv/Bq) -> 0.000014

Estimated intake and E(50) doses by fitting

I (Bq or Bq/day) Sd-method -> 26.8278	sd -> 0.233961	Chi2 -> 5.33582	(I(Bq or Bq/day) using ML -> 26.9106	Chi2 ML -> 12.3365	P-value MV -> 0.950035
Using I(Sd-method):>	Total Intake (Bq):>	14755.3*Bq	E(50):>	0.206574*mSv	
Using I(ML-method):>	Total Intake (Bq):>	14800.9*Bq	E(50):>	0.207212*mSv	

I is the intake (in Bq for an acute intake) or the daily intake (Bq/d for a chronic intake) computed using a the Sd-Method (the sample uncertainties are assumed normal) and the ML (maximum likelihood) method.



El resultado muestra que el individuo estuvo expuesto a una media diaria de 26.827 Bq/d (con el método estándar) o 26.91 Bq/d (con el método de ML) durante 550 días lo que da una incorporación total de 14.8 kBq que equivale a una dosis de 0.21 mSv.

■ **Caso I 131**

Un trabajador que estuvo trabajando 3 días con I-131 en forma de I-131 elemento, fue medido días después según los detalles que se muestran en la siguiente tabla

7.1.3.1 Organ activity measurement

Week days (d)	Time after the first day of handling (d)	Thyroid activity of <sup>131</sup> I (Bq)	Comment
Tuesday	0		1 <sup>st</sup> day of handling
Wednesday	1		2 <sup>nd</sup> day of handling
Thursday	2		3 <sup>rd</sup> day of handling
Friday	3		
Saturday	4		
Sunday	5		
Monday	6	2.1E+04	1 <sup>st</sup> day of measurement
Tuesday	7	2.5E+04	2 <sup>nd</sup> day of measurement
Wednesday	8	1.5E+04	3 <sup>rd</sup> day of measurement

Queremos estimar la cantidad incorporada por el trabajador y la dosis efectiva. Vamos a suponer que el trabajador ha estado expuesto a una incorporación continua durante 3 días. El día 7, 8 y 9 (suponemos estos momentos pues a falta de otra información consideramos que la medida se le toman al finalizar el día 6. 7 y 8)

□ **Entrada**

Element:

Intake pathway:

Intake type:

Decay constant (in days<sup>-1</sup>):

In case of ingestion (fA for ingestion):

Time of exposure for chronic intake (in days): (needed if constant intake is selected):

In case of inhalation:  
 AMAD :

Absortion factors(for inhalation): {fA, fr, sr, ss} (in days<sup>-1</sup>):

Bioassay type:

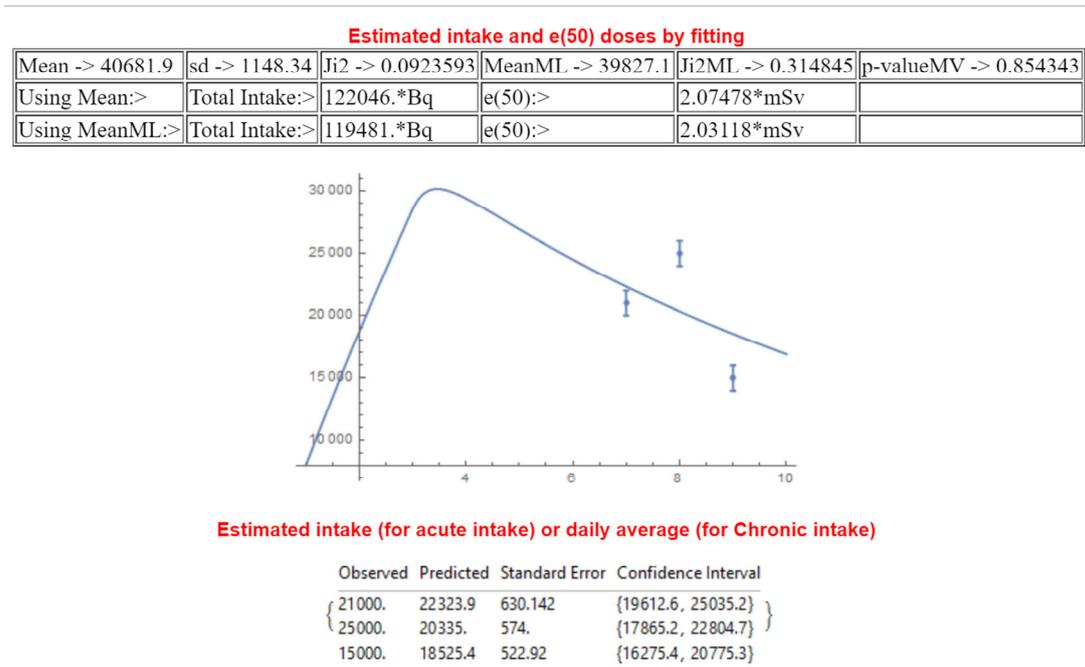
Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t2, m2, s2}, ...}, being ti=time, mi=measurement(Bq), si=uncertainty (\*)

Scattering factor B:

DCF (Bq/mSv):

LimitPlot: {min, max}:

□ Resultado



El trabajador incorporó 122 kBq (método estándar) o 120 kBq (método ML) que equivale a una dosis de 2.07 mSv o 2.03 mSv.

■ Bioassay Multifit

En el caso de que dispongamos dos tipos de bioensayos y queremos estimar la incorporación a partir de estos bioensayos elegimos en el menú elegimos: Multiresponse fit o Fit Model 2 (o escribimos directamente <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit3.jsp>), entonces se nos mostrará una pantalla como se muestra debajo.

Element:  Intake pathway:  Intake type:

Decay constant (in days<sup>-1</sup>):

In case of ingestion: fA (for Ingestion):

Time of exposure for chronic intake (in days): (needed if constant intake is selected)

In case of inhalation: AMAD:

Absorption factors(for inhalation): {fA, fr, sr, ss} (in days<sup>-1</sup>):

Bioassay type 1:

Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t2, m2, s2}, ...}, being ti=time, mi=measurement(Bq), si=uncertainty.  
 {{1, 18500, 18500\*0.04}, {10, 1875, 1875\*0.05}, {30, 1470, 1470\*0.05}}

Scattering factor B:

Bioassay type 2:

Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t2, m2, s2}, ...}, being ti=time, mi=measurement(Bq), si=uncertainty.  
 {{1, 11.2, 1.1}, {10, 0.3, 0.045}}

Scattering factor B:

DCF (Bq/mSv):

LimitPlot: {min, max}:

Los criterios para cumplimentar este caso son similares a los de un solo tipo de bioensayo, la diferencia es que aquí tendremos que elegir cada tipo de bioensayo e introducir la información requerida. Veamos un ejemplo de aplicación

■ **Caso Co 60**

Un trabajador ha estado expuesto a una incorporación puntual por inhalación a Co-60 en forma de oxido, tras la cual se le han realizado las medidas que se muestran en la tabla

Type of monitoring measurement	Isotope	Time after intake (d)	Type of measurement	Activity measurement (Bq)	Percentage uncertainty ( $\pm 2$ SD)
SPECIAL	Co-60	1	Whole body	18500	$\pm 4\%$
SPECIAL	Co-60	10	Whole body	1875	$\pm 5\%$
SPECIAL	Co-60	30	Whole body	1470	$\pm 5\%$
SPECIAL	Co-60	1	Urine (spot)	11.2	$\pm 10\%$
SPECIAL	Co-60	10	Urine (true 24 h)	0.3	$\pm 15\%$

□ **Entrada**

Element:  Intake pathway:  Intake type:   
 Decay constant (in days<sup>-1</sup>):  fA (for Ingestion):   
 Period of chronic intake (in days), it is applied when it has been chosen as intake type: constant:   
 The following parameters are required for inhalation. AMAD:   
 Absorption factors(for inhalation): {fA, fr, sr, ss} (in days<sup>-1</sup>):

Bioassay type 1:

Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t, m1, s2}, ...}  
 {{1, 18500, 18500\*0.04}, {10, 1875, 1875\*0.05}, {30, 1470, 1470\*0.05}}

Scattering factor B:

Bioassay type 2:

Bioassay data {{t1, m1, s1}, {t, m1, s2}, ...}  
 {{1, 11.2, 1.1}, {10, 0.3, 0.045}}

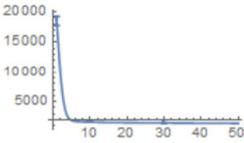
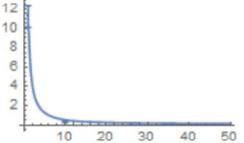
Scattering factor B:   
 DCF (Bq/mSv):  LimitPlot: {min, max}:

□ **Resultado**

*results*

**IRF and excretion factors**

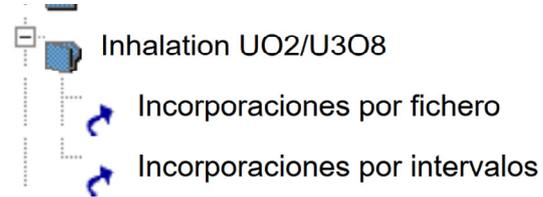
Mean -> 29649.4	sd -> 755.55	MeanML -> 28075.8	Ji2 -> 1430.9	Ji2ML -> 1.09482
Using Mean:>	Total Intake:>	29649.4*Bq	e(50):>	0.919132*mSv
Using MeanML:>	Total Intake:>	28075.8*Bq	e(50):>	0.870349*mSv

El trabajador ha incorporado 29,7 kBq (procedimiento estándar) o 28 kBq modelo ML con una dosis correspondiente de 0.9 mSv o 0.8 mSv.

## UO2 inhalación

Además de la opción general de ajuste (BioassayFit) que se ha visto, existe dos opciones específica aplicable a trabajadores expuestos ocupacionalmente a la inhalación de oxido de uranio a los que se realiza determinaciones de orina de 24h. Estas opciones se han realizado dentro de un acuerdo de colaboración entre GIR de Diseño Óptimo de la Universidad de Salamanca y la empresa ENUSA , que en la Fabrica de Juzbado realiza operaciones de fabricación donde se manejan oxidos de uranio.



El modelo biocinético del uranio utilizado es el de la ICRP 137. Uno de los cambios fundamentales es la utilización de factores específicos para  $f_A$ ,  $f_r$ ,  $s_r$  y  $s_s$  según al forma química en la que se inhale los aerosoles de uranio.

Inhaled particulate materials	Typical compounds	$f_A$	Absorption values			parameter
			$f_r$	$s_r$ (d <sup>-1</sup> )	$s_s$ (d <sup>-1</sup> )	
F	Uranium hexafluoride, UF <sub>6</sub> ; Uranyltributyl-phosphate U-TBP	0.02	1	10	-	
M	Uranylacetylacetonate; UF <sub>6</sub> ; DU aerosols from use of kinetic energy penetrators. vaporized U metal, UF <sub>4</sub>	0.004	0.2	3	0.005	
S	-	1E-04	0.01	3	1E-04	
Specific parameter values:						
Intermediate Type F/M	Uranyl nitrate UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ; Uranium peroxide hydrate UO <sub>4</sub> ; Ammonium diuranate ADU; Uranium trioxide UO <sub>3</sub>	0.016	0.8	1	0.01	
Intermediate Type M/S	Uranium octoxide U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ; Uranium dioxide UO <sub>2</sub>	6E-04	0.03	1	5E-04	
Uranium aluminide	UAl <sub>x</sub>	0.002	*	*	*	

\* $s_p = 1E-4d^{-1}$ ,  $s_{pi} = 0.004d^{-1}$ ,  $s_{ij} = 0.004d^{-1}$ .

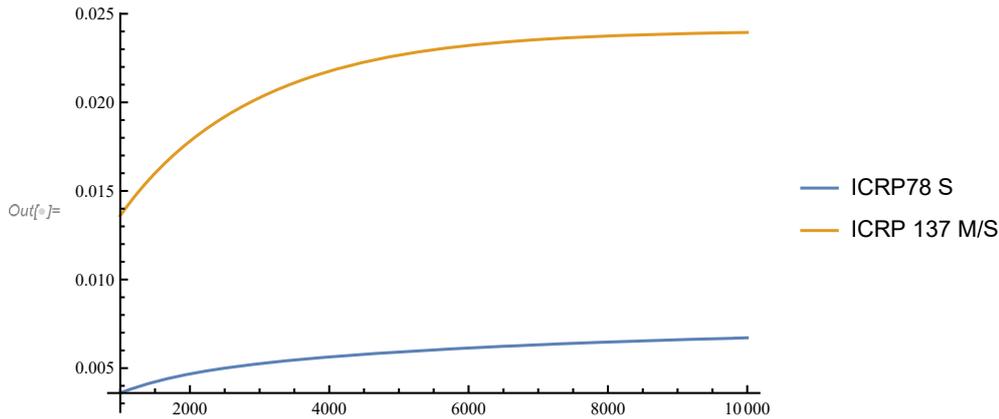
Los valores de  $f_A$  según la forma química del uranio ingerido son los siguientes:

Ingested material	$f_A$
Soluble forms	0.02
Relatively insoluble forms	0.002

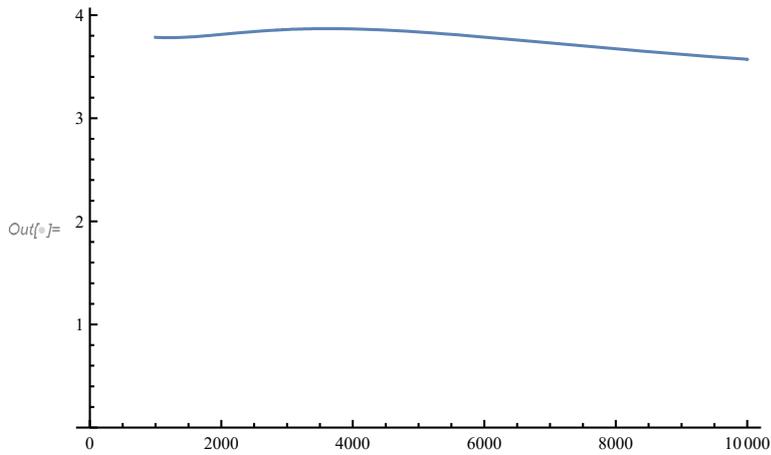
### □ Comparación ICRP 78 vs ICRP 137 para uranio en orina para casos de inhalación continua de 1 Bq de AMAD 5

Al aplicar el el nuevo modelo a los bioensayos de orina se ha visto que el modelo de la ICRP 78 sobre estimaba alrededor de 4 veces las incorporaciones.

Debajo se representa la excreción urinaria, en Bq/d de U, para el caso de inhalación constante de 1 Bq/d de U (es valida para cualquier enriquecimiento).



Para la gráfica anterior relación ICRP137/ICRP78 gráfica y numérica



Debajo se muestran los valores numéricos

{Días, Bq relación Bq/d excretado utilizando la ICRP 78 y la UCRP 137

1000	3.7839
2000	3.81212
3000	3.8599
4000	3.86582
5000	3.83592
6000	3.78643
7000	3.72962
8000	3.67274
9000	3.61948
10000	3.57138

Ademas del cambio anterior tambien se ha visto afectado los coeficientes de dosis efectiva (e(50) o FCD (se ha supuesto un enriq del 3.7% pero es muy similar para enriquecimientos entre 3% y 5%):

Committed effective dose coefficients (Sv Bq<sup>-1</sup>) for uranium isotopic mixtures - inhalation, 5 μm AMAD aerosols

LEU - Inhalation, 5 μm AMAD default reference aerosol	ICRP68 ISO16638-1	OIR	OIR/ICRP68
	Type S	Type M/S	0.84
Uranium octoxide U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ; Uranium dioxide UO <sub>2</sub>	6.4E-06	5.40E-06	

En definitiva : Para las inhacines de UO2 combinando ambos efectos (sobre valoración de las muestras de orina y nuevo e(50) las estimaciones de dosis realizadas aplicando la ICRP 68/78 respecto al nuevo modelo están orientativamente están sobrestimadas alrededor de 4 veces (aunque hay que valorar cada caso)

#### ■ Incorporaciones a intervalos

Para el caso mas habitual de una incorporación constantes durante un tiempo T utilice la opción que ya se visto: Bioassay fit (<http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit2.jsp>) o <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit2b.jsp>

En este caso vamos a considerar casos más complicados como es el de varias incorporaciones constantes, que pueden incluir incorporaciones puntuales utilice: <http://oed.usal.es/webMatematica/Biokmod/biokmodIntervalU.jsp>

A continuación se muestra su uso con un ejemplo de esta opción.

### ■ Entrada

Debajo se muestra la pantalla de entrada (se muestran a modo de ejemplo unos valores por defecto) y debajo se dan algunos criterios sobre como cumplimentar la entrada.

### NEW URANIUM MODEL. Fitting bioassay

Datos del trabajador:

Descripción de caso:

{{6400 b1, 0, 6400}, {323 b1, 6402, 323}, {69 b2, 6804, 69}, {70 b3, 7163, 70}}  
 En el cálculo de la dosis comprometedora (en mSv) se supone que las muestras de orina están expresadas en Bq/d de U o U-234, según se especifique cuando se le pide el día de las muestras de orina.

Parámetros desconocidos (incorporaciones medias diarias o puntuales bi) a ser estimado :   
 Indicar un valor para el inicio (es un requerimiento del algoritmo de ajuste) de la búsqueda de cada intervalo (0.01 funciona en la mayoría de las ocasiones, modificar exclusivamente si el resultado que se obtiene tiene valores incoherentes).

SF\_B 1.7   
 Marcar en el caso de que los datos de las muestras de orina correspondan a U-234 :

Ingresar los valores de las muestras de orina {..., {ti, mi, ui}, ...} (ti, en días, es el día en que se finaliza la recogida de la muestra (t=0 inicio de exposición del trabajador).

Composición típica del uranio en el área en el que el trabajador está expuesto (% en peso) [U-238, U-235, U-234], use un valor típico del último periodo.  (Este valor es utilizado para calcular los factores de conversión a dosis basados en [OIRDDataViewer](#))

Intervalo a ser representado (procure definirlo de forma que incluya los días en las que muestras se tomaron). Min:   
 Max:

**Worker data.-** Introducir los datos que se consideren necesarios para identificar al trabajador al que se le hace la evaluación

**Case description.-** Brevisima descripción (ej: Análisis rutinario, incorporación accidental, etc.

**Exposure intervals.-** Permite entrar múltiples incorporaciones crónicas y/o puntuales según el formato:  $\{b_i * T_i, s_i, T_i\}$ ,  $\{b_2 * T_2, s_2, T_2\}$ , ...,  $\{b_i * T_i, s_i, T_i\}$ , ..., donde  $b_i$  es la incorporación media durante el intervalo de exposición  $T_i$  (en días) tomando como inicio del intervalo  $T_i$  el día  $s_i$ , contado desde la fecha que el trabajador empezó a estar profesionalmente expuesto a UO2. Si durante más de un intervalo de exposición las condiciones de exposición con las mismas basta con utilizar el mismo símbolo para  $b_i$  en los dos o más intervalos. Por ejemplo, si las condiciones en el 1º y 2º intervalo han sido las mismas se escribirá:  $\{b_1 * T_1, s_1, T_1\}$ ,  $\{b_1 * T_2, s_2, T_2\}$ , ...,  $\{b_i * T_i, s_i, T_i\}$ , .... Asimismo si la incorporación  $b_i$  durante el intervalo  $T_i$  es conocida se escribirá su valor. Un ejemplo de este uso es el siguiente: Se dispone de un trabajador un informe disimétrico que indica en entre dos fechas  $j_1 = 0$  y  $j_2 = 1200$  el trabajador incorporó 1500 Bq entonces escribiremos: ...,  $\{1500, 0, 1200, \dots\}$ .

**Parameters to be fitted :** Los símbolos que hemos utilizado en **Exposure intervals** para indicar las incorporaciones desconocidas.

**Check is only the U-234 values are given in the urine samples:** Se marcará esa casilla si los datos de las muestras de orina que se van a introducir a continuación corresponden solo a medidas de U-234, en otro caso se supondrá que es las muestras de orina corresponden a BqU con el enriquecimiento que se especifica más adelante.

**24-Urine samples...:** Resultados de las muestras de orina:  $\{t_1, y_1, \sigma_1\}$ ,  $\{t_2, y_2, \sigma_2\}$ , ...,  $\{t_i, y_i, \sigma_i\}$ , } donde  $t_i$  es el momento del inicio de la toma de muestras  $i$ , en días, desde que el trabajador comenzó a estar expuesto a UO2;  $y_i$   $\sigma_i$  es el resultado de la determinación en BqU-234/d o BqU/d, según se haya indicado, y la incertidumbre correspondiente.

**Uranium composition:** porcentajes de U-238, U-235, U-234 correspondientes al enriquecimiento medio al que el trabajador ha estado expuesto. Este valor se utilizará en el cálculo de dosis así como para estimar la cantidad de U incorporada por el trabajador. En el caso de que los datos de las muestras de orina se hayan introducido en U234/día el programa estimará los BqU/día asumiendo la composición isotópica que se ha introducido

Una vez se pulse EVALUATE se generará una salida independiente que puede almacenarse, que los datos utilizados en la entrada utilizado junto con los resultados de la evaluación

### □ Ejemplo:

Un trabajador empezó a trabajar con UO<sub>2</sub> : desde 1998-06-01 a 2016-10-29, y desde el 2017-1-16 al 2017-03-26 y desde el 2018-01-10 al 2018-03-21. Las muestras de orina se tomaron el primer día de descanso (en la práctica puede corresponder al caso que el trabajador está expuesto hasta el viernes y la muestra la toma el sábado (mejor sería tomarla el domingo con 1 día completo sin exposición). En el ejemplo se tomó el día 2015-12-10. Observa que el periodo que va desde 1998-06-01 a 2016-10-29 debes dividirlo en dos pues el día 2015-2-09 que toma la muestra no está expuesto. Los datos de las medias y de los periodos se resumen debajo (las muestras se expresan en mBqU/d, al introducirlas al programa hay que convertirlas a BqU/d). Observa que hay un periodo, el que va de  $s_3$  a  $s_3+T_3$  en el que el trabajador estuvo expuesto y no se le tomó ninguna muestra (en la práctica esto debería evitarse).

$s_1$	$T_1$	$t_1$	$s_2$	$T_2$	$t_2$	$s_3$	$T_3$	$t_3 = s_4$	$T_4$	$t_4$
1	6400	6401	6402	323	6726	6804	69	7163	70	7235
		$y_1$			$y_2$			$y_3$		$y_4$
		1.76			2.23			1.54		2.09
		$\sigma_1$			$\sigma_2$			$\sigma_3$		$\sigma_4$
		0.26			0.32			0.27		0.31

Para preparar la entrada sugerimos lo siguiente:

1. Idéntica todas las fechas que aparecen en el ejercicio y expresaslas en enteros contadas desde el inicio de la exposición 1998-06-01 (Excel lo hace automáticamente)
2.  $\{j_1, j_2, j_3, j_4, j_5, j_6, j_7\} = \{6400, 6402, 6725, 6804, 6873, 7163, 7233\}$ ;  
Identifican los días en los que empieza cada periodo:  $\{s_1, s_2, s_3, s_4\} = \{0, 6402, 6804, 7163\}$ ;  
Identifica la duración de cada periodo:  $\{T_1, T_2, T_3, T_4\} = \{6400, 323, 69, 70\}$ ;
3. Finalmente tenderas la entrada  $\{ \{b_1 * T_1, s_1, T_1\}, \{b_1 * T_2, s_2, T_2\}, \{b_2 * T_3, s_3, T_3\}, \{b_2 * T_4, s_4, T_4\} \}$ , donde  $b_i$  son las actividades medias diarias que quieres estimar (para ello lo deberás decidir si tienes información para considerar los periodos en los que la exposición media diaria ha sido aproximadamente constante pues para eso casos usaras una misma  $b_i$ , esto es muy importante).
4. Naturalmente necesitas las medidas, en el ejemplo se supone que son BqU. Si un valor es LID, en ese caso usa:  $y_i = LID/2$  y  $\sigma_i = LID/2$ .
5. En nuestro caso las medidas son:  $\{ \{t_1, y_1, \sigma_1\}, \{t_2, y_2, \sigma_2\}, \{t_3, y_3, \sigma_3\}, \{t_4, y_4, \sigma_4\} \} = \{ \{6401, 1.76, 0.26\}, \{6726, 2.23, 0.32\}, \{7163, 1.54, 0.27\}, \{7235, 2.09, 0.31\} \}$ ;
6. En resumen;

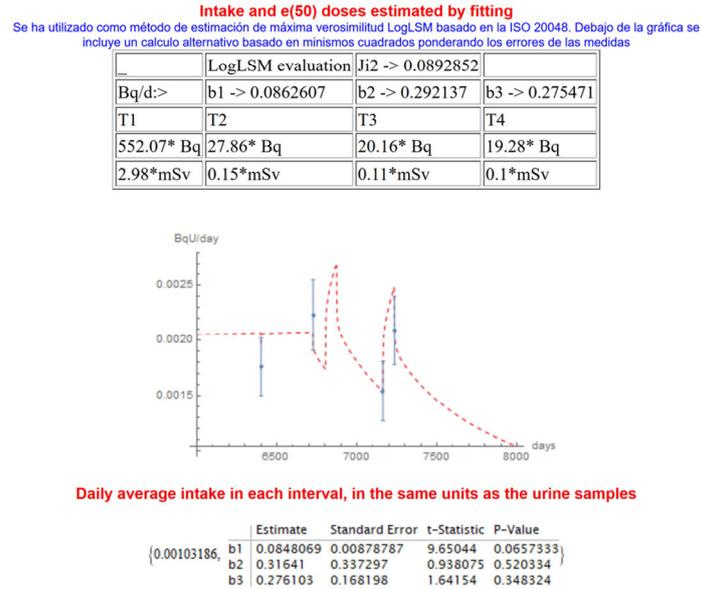
"si"	"Ti"	"ti"	"Yi"	"Si"
0	6400	6401	1.76	0.26
6402	323	6726	2.23	0.32
6804	69	7163	1.54	0.27

**Casos a valorar:** La entrada base es la **Figura: Modelo de entrada** con las diferencias en **Exposure intervals** y **Parameters to be fitted** que se indican

- Caso 1) El trabajador esta en los periodos T1 y T2 en el mismo puesto por lo que se asume que la incorporación media diaria es la misma  $b_1$ . El periodo T3 y T4 se traslada a otros puesto de trabajo y la incorporación media es  $b_2$  idéntica en ambos periodos T3 y T4. Se trata de determinar  $b_1$  y  $b_2$ . Se asume que en los dos periodos en los que se ha dividido el intervalo que va desde 1998-06-01 a 2016-10-29, esto es el que empieza en 0 y acaba en 6400 y el que empieza en 6402 y termina en 6402+323, la incorporación media diaria es  $b_1$ , en los otros intervalos se supone que corresponden a las mismas condiciones de incorporación y se asume que la incorporación media es  $b_2$ , idéntica para ambos periodos. Lo mas importante es definir los periodos de incorporación: Esto lo escribiremos:  $\{ \{6400 b_1, 0, 6400\}, \{323 b_1, 6402, 323\}, \{69 b_2, 6804, 69\}, \{70 b_2, 7163, 70\} \}$ , por tanto en Parameters to be fitted:  $\{b_1, b_2\}$
- Caso 2) El trabajador está en los periodos T1 y T2 en el mismo puesto por lo que se asume que la incorporación media diaria es la misma  $b_1$ . El periodo T3 lo hace en otro puesto de trabajo y la incorporación es  $b_2$ , y en el T4 en otro puesto distinto a los anteriores y la incorporación media diaria es  $b_3$ . Se trata de determinar  $b_1, b_2$  y  $b_3$ . Se asume que en los dos periodos en los que se ha dividido el intervalo que va desde 1998-06-01 a 2016-10-29, esto es el que empieza en 0 y acaba en 6400 y el que empieza en 6402 y termina en 6402+323, la incorporación media diaria es  $b_1$ , en los otros intervalos se supone que mientras permanece en cada uno de ellos tienen incorporaciones medias  $b_2$  y  $b_3$  respectivamente. Esto lo escribiremos:  $\{ \{6400 b_1, 0, 6400\}, \{323 b_1, 6402, 323\}, \{69 b_2, 6804, 69\}, \{70 b_3, 7163, 70\} \}$  por tanto en Parameters to be fitted:  $\{b_1, b_2, b_3\}$
- Caso 3) Al trabajador se supone que la incorporación en los primeros 6000 días es conocida por medidas previas y entonces se le asigno  $b_0 = 0.3$  Bq/día . Con ese dato de partida repetir el caso 1). Se asume que el trabajador estuvo sometida a una incorporación  $b_0 = 0.07$  Bq/d en el intervalo que va desde 0 hasta el día 4000 y que continuo trabajando en la misma área desde el día siguiente. El resto es igual que el caso 1. En este caso escribiremos en la entrada. Esto lo escribiremos:  $\{ \{0.07 * 4000, 0, 4000\}, \{2399 b_1, 4001, 2399\}, \{323 b_1, 6402, 323\}, \{69 b_2, 6804, 69\}, \{70 b_3, 7163, 70\} \}$  por tanto en Parameters to be fitted:  $\{b_1, b_2, b_3\}$

■ **Salida**

El pulsar Evaluate se genera una salida (como la de abajo, que muestra los datos de entrada utilizados en el calculo. Los datos de las incorporaciones se expresan en Bq, referido al U-total, lo mismo ocurre con las dosis,



## ■ Incorporaciones por fichero

### ■ Entrada

En este caso se importa un fichero con dos columnas con las incorporaciones diarias (basada en los SAS o PAS), debe estar en un fichero con dos columnas {d, Bq U}.

Home    Compartmental Mod▼    ICRP 66/78 Models▼    ICRP 130/134/137 models▼    Inhalation UO2/U3O8▼    Utilities▼

## Carga de fichero con las incorporaciones diarias del trabajador

Aquí se carga el fichero con los datos del trabajador. El fichero debe ser formato xlsx con dos columnas A y B con las incorporaciones diarias. En las celdas de la columna A debe ir el día J (en números contados) desde el día de incorporación del trabajador y en la columna B la actividad incorporada Ac(J, P) el día J en Bq U medida en el punto de muestreo P (admite que un mismo día tenga di incorporaciones).

Pulse [aquí](#) para descargar, y después importar, el fichero utilizado como ejemplo

Introduzca el fichero de puntos:  Ningún archi...seleccionado

Pulse *Visualizar Puntos* para ver la representación gráfica del fichero importado.

El gráfico resultante muestra la media móvil de las incorporaciones diarias, calculada a partir del fichero importado, con los datos de los últimos 50 días naturales.

Al pulsar Visualizar Puntos se muestra la siguiente pantalla donde están representado las incorporaciones, calculada como la media móvil de los últimos 50 días naturales y se ofrece al usuario varios campos que deben ser completados.

Hay que especificar la composición isotópica del uranio, a efectos de calculo de dosis, es introducida por el usuario (% peso) :

Hay que indicar si en las muestras de orina las actividades están en U-234 o U

Muestras de orina : {d, m, u} , d en días contados desde que el trabajador empezó a estar expuesto , m y u es la medida y su incertidumbre (en Bq/24h of U - 234, no es un requisito, pueden emplearse otras unidades)

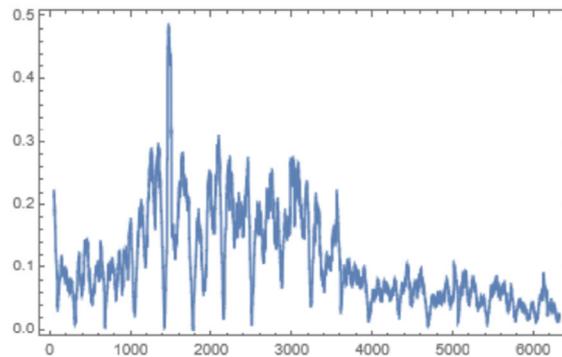
fecha inicio de la exposición : e . g . {1985, 01, 15};

Fechas para la que se desea calcular la exposición

El programa divide el periodo total en dos subperiodos T1 y T2, el T1 abarca desde el día 1 hasta el un numero de días especificados, previos a la primera toma de muestras, y T2 al resto. En T1, si no se disponen datos de de t=1 se estrapolan los datos disponibles en T1 hasta t=1

## Incorporaciones/dosis estimadas a partir de muestras de U en orina

Media móvil incorporaciones diarias



### TRADA

Nombre: "Pepe Garcia Sanchez"

Tipo: "Evaluación rutinaria"

Concentración del uranio en el área en el que el trabajador está expuesto (% en peso) (U-238, U-235, U-234), use un valor típico del último periodo. {95.765, 4.20, 0.035}

Indicar si los datos de las muestras de orina correspondan a U-234 :

Entrada de datos de muestras de orina :  $\{t1, m1, u1\}, \dots\}$

```
{{4010, 0.004545, 0.00059}, {4394, 0.009595, 0.00096}, {4990, 0.001665, 0.00031}, {5326, 0.004305, 0.00052}, {5879, 0.002175, 0.00054}}
```

Intervalo T1 (días previos a la primera muestra): 180

Fecha inicial: {2003, 10, 16} Periodo cálculo dosis: fecha inicial {2016, 01, 01} Fecha final {2017, 01, 01}

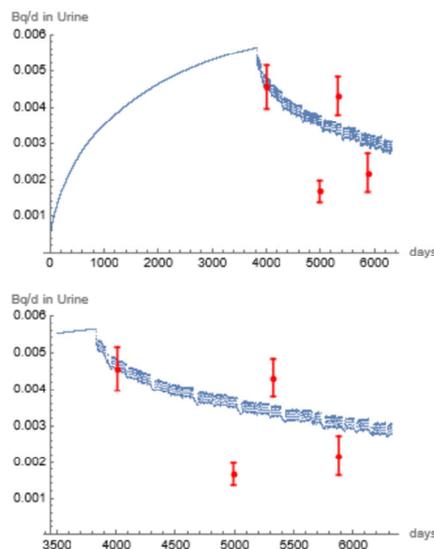
Límites OY {y1, y2}: {0, 0.006} Límites inferior =OX en días: 3500

#### Salida

A ejecutarlo se muestra la salida resultado muestra el factor de peso rb-wd), aplicable al día de exposición o "working day"(wd) del intervalo T1 respecto a T2, las actividades y dosis para los intervalos T1 y T2 y para el rango de fechas elegido. Además se representa el ajuste obtenido.

Name -> "Pepe Garcia Sanchez"
Description -> "Evaluación rutinaria"
Urine Samples -> {{4010, 0.004545, 0.00059}, {4394, 0.009595, 0.00096}, {4990, 0.001665, 0.00031}, {5326, 0.004305, 0.00052}, {5879, 0.002175, 0.00054}}
Isotopic composition (% wt) -> {95.765, 4.20, 0.035}
Dose coefficient e(50). AMAD 5, M/S - > {4.8*10 <sup>-3</sup> mSv/BqU238, 5.1*10 <sup>-3</sup> mSv/BqU235, 5.5*10 <sup>-3</sup> mSv/BqU234, 0.00539897*mSv/BqU}

Ji2	5.33167
rb_wd	2.51
BqU/wd	0.181702
BqU/nd	0.0913603
Total BqU for T1	984
Total BqU for T2	228
Total mSv for T1	5.31
Total mSv for T2	1.23
BqU entre fechas elegidas	35
mSv entre fechas elegidas	0.189



## Incertidumbres/Simulador

La estimación de las incorporaciones, basadas en bioensayos, implican varias incertidumbres, además de la propias de la medida. Destacan las siguientes:

- La propia de la variabilidad de la exposición.- Aunque es frecuente asumir que la incorporaciones de aerosoles de uranio se producen de forma constante o crónica, realmente estas tienen un carácter aleatorio. Además, existen periodos en los que el trabajador no está expuesto, como son los descansos semanales y las vacaciones.
  - Fondo.- En el caso de las muestras de orina hay uranio atribuible a la dieta, especialmente la seguida por el trabajador los días previos a la toma de muestra (particularmente al agua ingerida) que es indistinguible de la exposición profesional. Sin embargo, a veces su contribución puede valorarse (por ejemplo: teniendo en cuenta la composición isotópica de la muestra).
  - Modelos.- Los modelos biocinéticos utilizan parámetros de referencia que pueden presentar importantes diferencias, en algunas personas. Esto puede observarse por comparación con trabajadores que hayan estado sometidos a puestos similares.
- En casos de incorporaciones muy elevadas algunas incertidumbres pueden reducirse empleando más de un tipo de bioensayo.

### ▣ Incorporaciones múltiples y aleatorias

The predicted retention or excretion of the worker after a time  $t$  (usually in days) after the first intake occurred, considering that  $t$  only takes integer values (this is only a practical consideration, but it is not a mathematical requirement), will be:

$$R_M(t) = b_1 r(t) + b_2 r(t-1) + \dots + b_n r(1) = \sum_{j=1}^t b_j r(t-j+1) \text{ eq. 1}$$

But really the individual daily intake  $b_j$  is a random variable being the average  $\hat{\mu}_b$  and standard deviation  $\sigma_b^2$  being  $N$  the number of working days

$$\sigma_{b_i}^2 = \frac{1}{N_i-1} \sum (b_{i,j} - \hat{\mu}_{b_i})^2$$

$$B_i = \hat{b}_i T_i = \hat{\mu}_{b_i} N_i \text{ and}$$

$$\hat{b} = \hat{\mu}_b N/t$$

In eqn.1 it is assumed  $b_j r(t-j+1)$  takes small values. Considering a large number of single inputs  $b_j$  then it is showed (Lopez-Fidalgo and Sanchez León, 2005, Sanchez León, 2007) that the retention function  $R_{\text{rand}}(t)$  and the corresponding probability bands are given by as follows:

$$R_{\text{rand}}(t) = \mu_{b_i} \sum_{j=1}^t r(j) \pm z \frac{\gamma+1}{2} \sigma_{b_i} \sqrt{\sum_{j=1}^t r^2(j)} \text{ eq. 2}$$

being  $\hat{\mu}_{b_i,k} = \frac{1}{N_i} \sum b_{i,i}$ ,  $\sigma_{k,i}^2 = \frac{1}{N_i-1} \sum (b_i - \hat{\mu}_{b_i,i})^2$  and  $z$  is the  $100(\gamma+1)/2$ -quantile of the standard normal distribution.

Estas funciones se han incorporado en BIOKMOD: INHALATION UO2/U3O8-> SIMULADOR (<http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodaccident.jsp>)

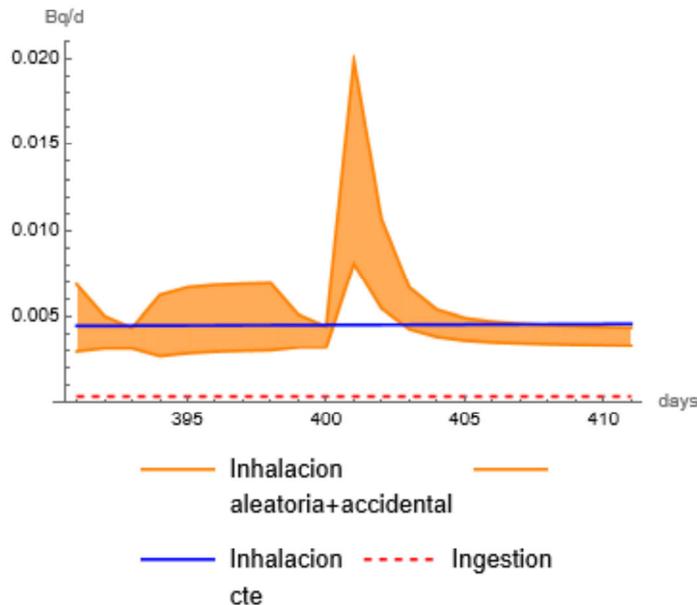
- Permite simular incorporaciones continuas, teniendo en cuenta la componente aleatoria, conjuntamente con accidentales, y ademas valorar el efecto de las incorporaciones por ingestión. Sirve, por ejemplo, para valorar si sucesivas muestras de valor elevado están relacionadas con una incorporación accidental o puede tener otras causas.

produce la incorporación accidental (en días desde que el trabajador empezó a estar expuesto):  Cantidad accidental incorp

l:  Variabilidad (sig/media):  Incorporación por ingestión (Bq/d):

ca desde:  días antes de la incorporación accidental hasta:  días después.

### Excreción urinaria



## Incorporaciones de UO2/U3O8, estimaciones a partir de muestras de orina. Casos ejemplo

Home    Compartmental Mod▼    ICRP 66/78 Models▼    ICRP 130/134/137 models▼    Inhalation UO2/U3O8▼  
 Utilities▼

En todos los casos que vamos a proponer consideramos supondremos que el trabajador empezó a estar expuesto a aerosoles de UO2 el 1 de julio de 2010 y no tenia exposición profesional previa a U. Este trabajador no esta expuesto los fines de semana ni en vacaciones de verano y otras (quizás no necesite está información pero se ha utilizado para simular los valores de exposición del trabajador en condiciones realistas). El trabajador se le realizan determinaciones de uranio en muestras de muestras de orina 24. El formato de los resultados es  $\{t_i, m_i, u_i\}$ , donde  $t_i$  es el día (como número entero) que el que se finaliza de recoger la muestra de 24 contado desde el día de inicio de la exposición (2010-01-01),  $m_i$  es el resultado de la medida Bq/d de U (en la práctica es frecuente usar solo los valores de U-234), y  $u_i$  es la incertidumbre de la medida con un 95% de confianza. En todos los ejercicios suponga la composición  $\{\%U-238, \%U-235, \%U-234\}$ : {96.226, 3.701, 0.0033}

Para el caso de una incorporación constante se puede utilizar: <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit2.jsp> o <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit2b.jsp>

Incorporaciones múltiples ctes/simples: <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodIntervalU.jsp>

Incorporaciones múltiples simples a partir de fichero (la evaluación es practicamente automática): <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodMultiinputs.htm>

Simulador: <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodaccident.jsp>

■ **Caso 1.- El trabajador ha permanecido en el mismo puesto desde el inicio. Los resultados de las determinaciones de orina en Bq/d son los que se muestran debajo.**

```
caso1 = {{159, 0.00299, 0.000450}, {524, 0.00575, 0.00086},
        {889, 0.00644, 0.00097}, {1254, 0.00724, 0.00109}, {1619, 0.00874, 0.00131},
        {1984, 0.00937, 0.00141}, {2349, 0.01106, 0.00166}, {2714, 0.00987, 0.00148},
        {3079, 0.01023, 0.00153}, {3444, 0.01197, 0.0018}};
```

Se pide estimar la cantidad total incorporada desde el inicio hasta que se toma la última muestra en la que se supone deja de estar expuesto. Las muestras se toma el último día previo a las vacaciones de verano.

□ **Sol**

<http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit2.jsp> o <http://oed.usal.es/webMathematica/Biokmod/biokmodfit2b.jsp>

/orker data: "Pepe Garcia Sanchez"

ase description:

JO2 inhalation"

elect Element: Uranium ▼ Pathway: Inhalation ▼ Intake type: Constant ▼ Time of exposure for chronic intake (in days): (if constant intake is selected): 3444

ecay constant (in days<sup>-1</sup>): U ▼ Or 0.0

case of ingestion (fA for ingestion): 0.99

case of inhalation select:

MAD5 ▼ CLASS: UraniumMS ▼ Or {fA, fr, sr, ss}

ioassay: Urine ▼

ioassay data {{t1, m1, s1}, {t2, m2, s2}, ...}, being ti=time, mi=measurement(Bq), si=uncertainty (\*)

```
{159, 0.00299, 0.000450}, {524, 0.00575, 0.00086}, {889, 0.00644,
0.00097}, {1254, 0.00724, 0.00109}, {1619, 0.00874, 0.00131}, {1984,
0.00937, 0.00141}, {2349, 0.01106, 0.00166}, {2714, 0.00987,
0.00148}, {3079, 0.01023, 0.00153}, {3444, 0.01197, 0.0018}}
```

attering factor B: 1.70

ose coefficient e(50) (mSv/Bq): U-234, Inhalation, Aerosols Type M/S: fA=6E-4, 5 Åµm ▼ Or

.0

mitPlot: {min, max}: {100, 4000}

Push EVALUATE, wait a few seconds.  
 Manual:> 

Evaluate

## Dosimetry report

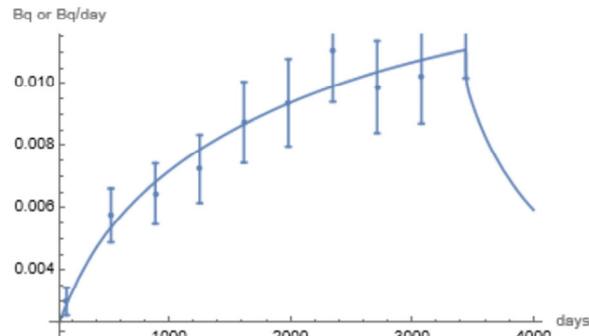
### Input data

Name -> Pepe Garcia Sanchez
Description -> UO2 inhalation
Uranium
Decay constant -> 0
Pathway -> Inhalation
Type of intake -> Constant
{fA, fr, sr, ss} -> {0.0006, 0.03, 1, 0.0005}
Bioassay -> Urine
Scattering B-factor -> 1.7
Dose coefficient e(50) (mSv/Bq) -> 0.0055

### Estimated intake and E(50) doses by fitting

I (Bq or Bq/day) Sd-method -> 0.526789	sd -> 0.0250611	Chi2 -> 0.0399967	(I(Bq or Bq/day) using ML -> 0.52976	Chi2 ML -> 0.126042
Using I(Sd-method):>	Total Intake (Bq):>	1814.26*Bq	E(50):>	9.97843*mSv
Using I (ML-method):>	Total Intake (Bq):>	1824.49*Bq	E(50):>	10.0347*mSv

I is the intake (in Bq for an acute intake) or the daily intake (Bq/d for a chronic intake) computed using a the Sd-Method (the sample uncertainties are assume ML(maximum likelihood) method.



- **Caso 2.-** Idéntico al caso 1 con la diferencia de que las muestra se toman al trabajador después de 8 días sin exposición.

```

caso2 = {{168, 0.0022, 0.00033}, {533, 0.00427, 0.00064},
        {898, 0.00537, 0.00081}, {1263, 0.00686, 0.00103}, {1628, 0.00745, 0.00112},
        {1993, 0.00778, 0.00117}, {2358, 0.00895, 0.00134}, {2723, 0.00923, 0.00138},
        {3088, 0.00959, 0.00144}, {3453, 0.00989, 0.00148}}
    
```

- **Sol**

Tenemos en cuenta los descansos de 8 días sin incorporacion:

```

{{159 b1, 0, 159}, {355 b1, 169, 355}, {355 b1, 534, 355},
 {355 b1, 899, 355}, {355 b1, 1264, 355}, {355 b1, 1629, 355}, {355 b1, 1994, 355},
 {355 b1, 2359, 355}, {355 b1, 2724, 355}, {355 b1, 3089, 355}, {355 b1, 3454, 355}}
{{1825 b1, 0, 1825}, {1825 b2, 1826, 1825}}
    
```

## URANIUM MODEL. Fitting bioassay

(Updated: 2021-12-12. Comments to: guillermo2046(at)gmail.com writing in the Subject:"BIOKMOD").

Aplicación para la estimación de las incorporaciones de uranio por inhalación (UO2/U3O8) a partir de muestras de orina. Se emplea el nuevo modelo biocinético para el URANIO descrito en la ICRP 130 y ICRP 137. Se utilizan los factores de absorción aplicables al UO2/U3O8 (S/M:  $\lambda = 0.0006$ ; fr = 0.03, sr = 1, ss = 0.0005) y se supone AMAD 5.

Datos del trabajador: "Pepe Garcia Sanchez"

Descripción de caso: "Evaluación rutinaria"

Las incorporaciones se supone que se producen en intervalos constantes  $\{(b1 T0, s0, T0), (b2 T1, s1, T1), \dots, (bi Ti, si, Ti), \dots\}$  que pueden combinarse con incorporaciones puntuales  $\{b1 s1, \dots, si, \dots\}$  donde  $bi$  es el promedio diario durante el intervalo  $Ti$ , en días, de incorporación crónica, y "si" el tiempo transcurrido (en días) desde el inicio hasta el momento en el que el intervalo  $Ti$  empieza ( $t=0$  inicio de exposición del trabajador) o, en el caso de incorporación puntual "si" es el tiempo desde el inicio (en días) en el que se produce la incorporación puntual "bi".  
 Notas: la misma incorporación media diaria puede asumirse en distintos intervalos. Asimismo si un intervalo la incorporación es conocida puede utilizarse como dato (ejemplo: si  $b1 = 0.08$  Bq/d en  $T1$  entonces  $\{(6400 \cdot 0.08, 0, 6400), (323 b1, 6402, 323), \dots\}$ ). Es importante tener en cuenta el tiempo transcurrido entre que cesa la incorporación y se toma la muestra de orina.

```
{{159 b1, 0, 159}, {355 b1, 169, 355}, {355 b1, 534, 355}, {355 b1, 899, 355}, {355 b1, 1264, 355}, {355 b1, 1629, 355}, {355 b1, 1994, 355}, {355 b1, 2359, 355}, {355 b1, 2724, 355}, {355 b1, 3089, 355}, {355 b1, 3454, 355}}
```

En el cálculo de la dosis comprometida (en mSv) se supone que las muestras de orina están expresadas en Bq/d de U o U-234, según se especifique cuando se le pide el dato de las muestras de orina.

Parámetros desconocidos (incorporaciones medias diarias o puntuales  $bi$ ) a ser estimado:

Indicar un valor para el inicio (es un requerimiento del algoritmo de ajuste) de la búsqueda de cada intervalo (0.01 funciona en la mayoría de las ocasiones, modificar exclusivamente si el resultado que se obtiene tiene valores incoherentes).

SF\_B 

Marcar en el caso de que los datos de las muestras de orina correspondan a U-234:

Ingresar los valores de las muestras de orina  $\{\dots, \{ti, mi, ui\}, \dots\}$  ( $ti$ , en días, es el día en que se finaliza la recogida de la muestra ( $t=0$  inicio de exposición del trabajador).

```
{{168, 0.0022, 0.00033}, {533, 0.00427, 0.00064}, {898, 0.00537, 0.00081}, {1263, 0.00686, 0.00103}, {1628, 0.00745, 0.00112}, {1993, 0.00778, 0.00117}, {2358, 0.00895, 0.00134}, {2723, 0.00923, 0.00138}, {3088, 0.00959, 0.00144}, {3453, 0.00989, 0.00148}}
```

Composición típica del uranio en el área en el que el trabajador está expuesto (% en peso) {U-238, U-235, U-234}, use un valor típico del último periodo.  (Este valor es utilizado para calcular los factores de conversión a dosis basados en [OIRDataViewer](#).)

Intervalo a ser representado (procure definirlo de forma que incluya los días en las que muestras se tomaron). Min:  Max:

Push EVALUATE, wait a few seconds.  
Manual:

[results](#)

Salida

### INFORME DOSIMETRICO

Input data

Name -> "Pepe Garcia Sanchez"
Description -> "Evaluación rutinaria"
Data -> {{159 b1, 0, 159}, {355 b1, 169, 355}, {355 b1, 534, 355}, {355 b1, 899, 355}, {355 b1, 1264, 355}, {355 b1, 1629, 355}, {355 b1, 1994, 355}, {355 b1, 2359, 355}, {355 b1, 2724, 355}, {355 b1, 3089, 355}, {355 b1, 3454, 355}}
Urine Samples -> {{168, 0.0022, 0.00033}, {533, 0.00427, 0.00064}, {898, 0.00537, 0.00081}, {1263, 0.00686, 0.00103}, {1628, 0.00745, 0.00112}, {1993, 0.00778, 0.00117}, {2358, 0.00895, 0.00134}, {2723, 0.00923, 0.00138}, {3088, 0.00959, 0.00144}, {3453, 0.00989, 0.00148}}
Isotopic composition (% wt) -> {96.226, 3.701, 0.0033}
Dose coefficient e(50). AMAD 5, M/S -> {4.8*10^-3 mSv/BqU238, 5.1*10^-3 mSv/BqU235, 5.5*10^-3 mSv/BqU234, 0.00507547*mSv/BqU}

The above table represents the input data for a worker exposed to a daily intake  $b_1, b_2, \dots, b_i$  of UO<sub>2</sub>/U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> enriched during different periods of time  $T_1, T_2, \dots, T_i$ . The  $b_1, \dots, b_i$  values are unknown, they are estimated taking at the worker 24-urine samples. This information is introduced in the above table as follow:

Data -> {{ $b_1 T_0, s_0, T_0$ }, { $b_2 T_1, s_1, T_1$ }, ..., { $b_i T_i, s_i, T_i$ }, ...} being  $b_i$  the average daily intake during the interval  $T_i$ , in days, of chronic exposure, and  $s_i$  the moment (in days from  $t=0$ ) when the interval  $T_i$  began.

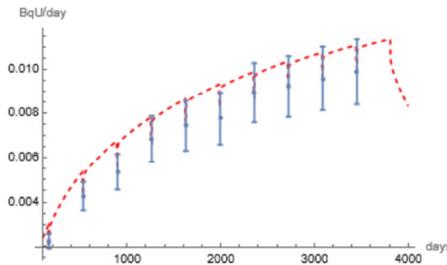
Urine Samples -> {{ $t_1, m_1, u_1$ }, { $t_2, m_2, u_2$ }, ..., { $t_k, m_k, u_k$ }, ...} being  $t_i$  the moment (in days from  $t=0$ ) where the sample 24-h started collecting,  $m_i$  the value of sample  $i$  in BqU/day or BqU<sub>234</sub>/day and  $u_i$  the corresponding uncertainty of  $m_i$  in the same unit.

Isotopic composition (% wt) -> {wt U<sub>238</sub>, wt U<sub>235</sub>, wt U<sub>234</sub>}

Intake and e(50) doses estimated by fitting

Se ha utilizado como método de estimación de máxima verosimilitud LogLSM basado en la ISO 20048. Debajo de la gráfica se incluye un calculo alternativo basado en mínimos cuadrados ponderando los errores de las medidas

	LogLSM evaluation	Ji2 -> 0.0916558								
Bq/d:>	b1 -> 0.529209									
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
84.14* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq	187.87* Bq
0.43*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv	0.95*mSv



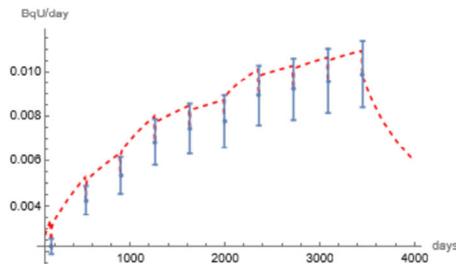
**IMPORTANTE:**

Repetimos pero suponemos que en cada periodo las condiciones de exposición son distintas: { $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}$ }. Nos lleva a una solución aparente de ajuste perfecto pero el resultado del modelo queda indefinido (tenemos tantos parámetros como muestras). El número de muestras debe ser mayor que el de parámetros a estimar, mientras mayor sea la diferencia entre el numero de muestras y el de parámetros mejor quedara definido el modelo, aunque se obtengan valores apranete peores paraa Ji2 o P-valor:

## Intake and e(50) doses estimated by fitting

Se ha utilizado como método de estimación de máxima verosimilitud LogLSM basado en la ISO 20048. Debajo de la gráfica se incluye un calculo alternativo basado en mínimos cuadrados ponderando los errores de las medidas

	LogLSM evaluation	Ji2 - > 3.97568 10 <sup>-9</sup>									
Bq/d:>	b1 - > 0.608345	b2 - > 0.504858	b3 - > 0.474322	b4 - > 0.572175	b5 - > 0.505555	b6 - > 0.466914	b7 - > 0.589585	b8 - > 0.517488	b9 - > 0.522065	b10 - > 0.519791	b11 - > 0.01
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	
96.73* Bq	179.22* Bq	168.38* Bq	203.12* Bq	179.47* Bq	165.75* Bq	209.3* Bq	183.71* Bq	185.33* Bq	184.53* Bq	3.55* Bq	
0.49*mSv	0.91*mSv	0.85*mSv	1.03*mSv	0.91*mSv	0.84*mSv	1.06*mSv	0.93*mSv	0.94*mSv	0.94*mSv	0.02*mSv	



### ■ Caso 3.-

Un trabajador está en una empresa A expuesto ocupacional desde el 1 de enero de 2010 a la inhalación de UO<sub>2</sub>/U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> durante 1780 días. Al dejar la empresa A esta emite un certificado disimétrico asignando 47.1 mSv para todo el periodo (realizada utilizando uranio en orina y aplicando la ICRP68/78, pero no proporciona los resultados de los análisis).

Ingresa en la empresa B el día 1826 en la que continúa actualidad, sigue estando expuesto a aerosoles de UO<sub>2</sub>/U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. Se le continúan realizando determinaciones de orina con los resultados que se indican debajo.

CAS03 = {{1984, 0.01516, 0.00152}, {2349, 0.01749, 0.00175},  
{2714, 0.01534, 0.00153}, {3079, 0.01405, 0.00140}, {3444, 0.01345, 0.00135}};

- ¿Que actividad total ha incorporado en el periodo 1826 a 3655? ¿Que dosis efectiva ha recibido el último año (desde el día 3290 a 3655)?

#### □ Sol 1

A partir de los 47.1 mSv puede calcularse los Bq U correspondientes: (aunque esta equivalencia solo valdrá para estimar los Bq incorporados por el trabajador pero no para resignarle una nueva dosis pasada)

$$In[*]= (47.1 / (3.86 * 6.4 / 5.4)) / (5.4 * 10^{-3})$$

$$Out[*]= 1906.57$$

Inputs segun pregunta:

$$In[*]= 3655 - 1826$$

$$Out[*]= 1829$$

$$\{\{1907, 0, 1780\}, \{1829 \text{ b2}, 1826, 1829\}\}$$

Composición isotópica: {96.226, 3.701, 0.033}

Input data

Name -> "Pepe Garcia Sanchez"
Description -> "Evaluación rutinaria"
Data -> {{1907, 0, 1780}, {1829 b2, 1826, 1829}}
Urine Samples - > {{1984, 0.01516, 0.00152}, {2349, 0.01749, 0.00175}, {2714, 0.01534, 0.00153}, {3079, 0.01405, 0.00140}, {3444, 0.01345, 0.00135}}
Isotopic composition (% wt) -> {96.226, 3.701, 0.033}
Dose coefficient e(50). AMAD 5, M/S - > {4.8*10^-3 mSv/BqU238, 5.1*10^-3 mSv/BqU235, 5.5*10^-3 mSv/BqU234, 0.00539479*mSv/BqU}

The above table represents the input data for a worker exposed to a daily intake  $b_1, b_2, \dots, b_i$  of UO<sub>2</sub>/U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> enriched during different periods of time  $T_1, T_2, \dots, T_i$ . The  $b_1, \dots, b_i$  values are unknown, they are estimated taking at the worker 24-urine samples. This information is introduced in the above table as follow:

Data-> {{ $b_1 T_0, s_0, T_0$ }, { $b_2 T_1, s_1, T_1$ }, ..., { $b_i T_i, s_i, T_i$ }, ...} being  $b_i$  the average daily intake during the interval  $T_i$ , in days, of chronic exposure, and  $s_i$  the moment (in days from  $t=0$ ) when the interval  $T_i$  began.

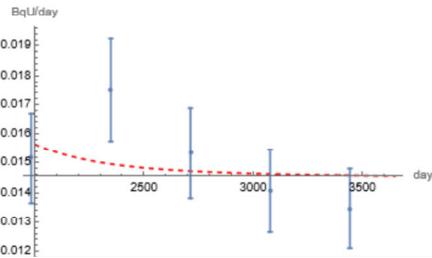
Urine Samples -> {{ $t_1, m_1, u_1$ }, { $t_2, m_2, u_2$ }, ..., { $t_k, m_k, u_k$ }, ...} being  $t_i$  the moment (in days from  $t=0$ ) where the sample 24-h started collecting,  $m_i$  the value of sample  $i$  in BqU/day or BqU<sub>234</sub>/day and  $s_i$  the corresponding uncertainty of  $m_i$  in the same unit.

Isotopic composition (% wt) -> {wt U238, wt U235, wt U234}

Intake and e(50) doses estimated by fitting

Se ha utilizado como método de estimación de máxima verosimilitud LogLSM basado en la ISO 20048. Debajo de la gráfica se incluye un cálculo alternativo basado en mínimos cuadrados ponderando los errores de las medidas

	LogLSM evaluation	Ji2 -> 0.121456
Bq/d:>	b2 -> 0.581267	
T1	T2	
1907.* Bq	1063.14* Bq	
10.29*mSv	5.74*mSv	



Para mostrar el incorporación específica del último año, se puede dividir el periodo T2 en dos periodos, el último corresponde al último año que va desde 3290, a 3290+365. Entonces como como input: {{1907, 0, 1780}, {1463b2, 1826, 1463}, {365b2, 3290, 365}} siendo T3 es la información del último año

Intake and e(50) doses estimated by fitting

a utilizado como método de estimación de máxima verosimilitud LogLSM basado en la ISO 20048. Debajo de la gráfica se incluye un cálculo alternativo basado e mínimos cuadrados ponderando los errores de las medidas

	LogLSM evaluation	Ji2 -> 0.121063
Bq/d:>	b2 -> 0.581499	
T1	T2	T3
1907.* Bq	850.73* Bq	212.25* Bq
10.29*mSv	4.59*mSv	1.15*mSv

- El día 3700, lunes (los dos días anteriores no estuvo expuesto) recibe una incorporación accidental. Se le toma una muestra de orina durante el día 3702 dando por resultado 0.070+/-0.015 Bq U ¿Que dosis se estima que recibió (aplicando el modelo de la ICRP 137)?

□ Sol 2

Ahora consideramos el input accidental, que ocurre, en  $t=3700$ , inmediatamente después del el periodo T2 teniendo en cuenta 2 días sin incorporación

$$In[*]= 3698 - 1826$$

$$Out[*]= 1872$$

{{1907, 0, 1780}, {1872 b2, 1826, 1872}, {b3, 3700}}

- Añadimos la nueva muestra de orina : {3702, 0.070, 0.015}

**Input data**

Name -> "Pepe Garcia Sanchez"
Description -> "Evaluación rutinaria"
Data -> {{1907, 0, 1780}, {1872 b2, 1826, 1872}, {b3, 3700}}
Urine Samples -> {{1984, 0.01516, 0.00152}, {2349, 0.01749, 0.00175}, {2714, 0.01534, 0.00153}, {3079, 0.01405, 0.00140}, {3444, 0.01345, 0.00135}, {3702, 0.070, 0.015}}
Isotopic composition (% wt) -> {96.226, 3.701, 0.033}
Dose coefficient e(50). AMAD 5, M/S -> {4.8*10^-3 mSv/BqU238, 5.1*10^-3 mSv/BqU235, 5.5*10^-3 mSv/BqU234, 0.00539479*mSv/BqU}

The above table represents the input data for a worker exposed to a daily intake  $b_1, b_2, \dots, b_i$  of UO<sub>2</sub>/U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> enriched during different periods of time T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, ..., T<sub>i</sub>. The  $b_1, \dots, b_i$  values are unknown, they are estimated taking at the worker 24-urine samples. This information is introduced in the above table as follow:

Data-> {{b1 T0, s0, T0}, {b2 T1, s1, T1}, ..., {b<sub>i</sub> T<sub>i</sub>, s<sub>i</sub>, T<sub>i</sub>}, ...} being  $b_i$  the average daily intake during the interval T<sub>i</sub>, in days, of chronic exposure, and  $s_i$  the moment (in days from t=0) when the interval T<sub>i</sub> began.

Urine Samples -> {{t1, m1, u1}, {t2, m2, u2}, ..., {t<sub>k</sub>, m<sub>k</sub>, u<sub>k</sub>}, ...} being  $t_i$  the moment (in days from t=0) where the sample 24-h started collecting,  $m_i$  the value of sample  $i$  in BqU/day or BqU<sub>234</sub>/day and  $u_i$  the corresponding uncertainty of  $m_i$  in the same unit.

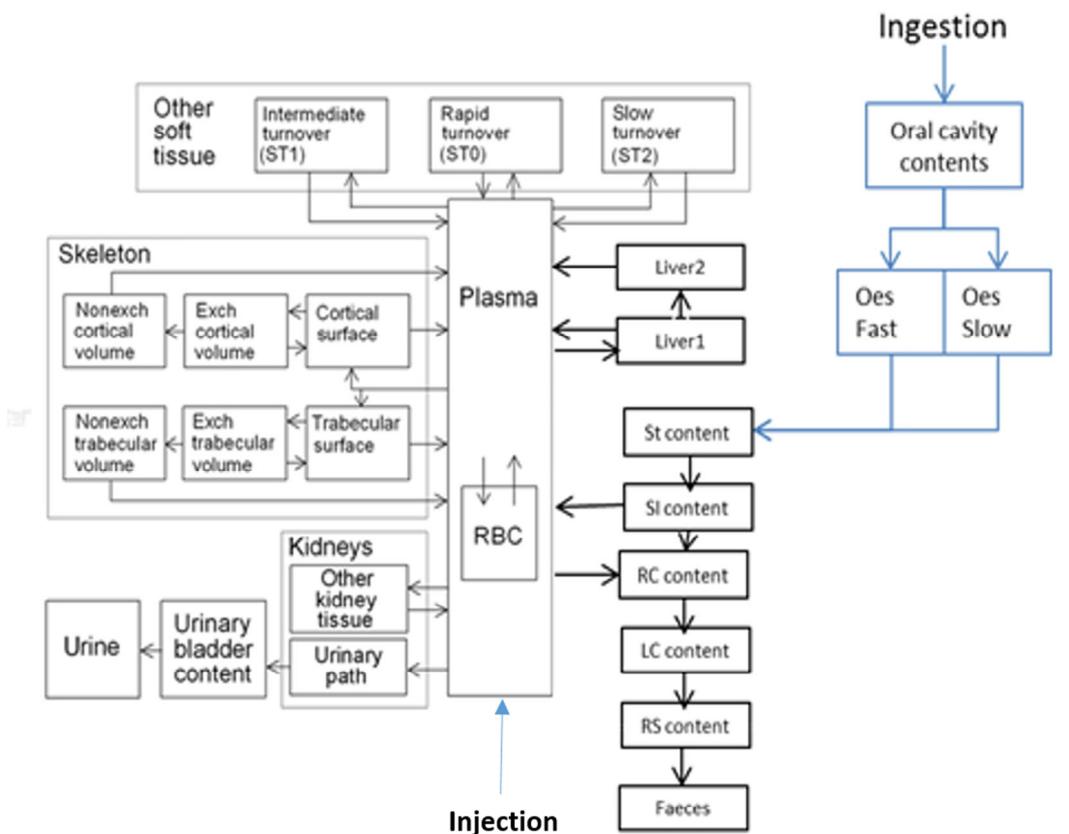
Isotopic composition (% wt) -> { %wt U238, %wt U235, %wt U234 }

**Intake and e(50) doses estimated by fitting**

Se ha utilizado como método de estimación de máxima verosimilitud LogLSM basado en la ISO 20048. Debajo de la gráfica se incluye un calculo alternativo basado en mínimos cuadrados ponderando los errores de las medidas

	LogLSM evaluation		Ji2 -> 0.121456
Bq/d:->	b2 -> 0.581267	b3 -> 209.443	
T1	T2	T3	
1907.* Bq	1088.13* Bq	209.44* Bq	
10.29*mSv	5.87*mSv	1.13*mSv	

- ¿Considera que el fondo (atribuible a la alimentación) puede afectar considerablemente a la estimación de esta dosis accidental? Se puede valorar utilizando el SIMULADOR
- Caso 4.- Construya y resuelva paso a paso el modelo compartimental aplicable al uranio de la ICRP 137 (que se muestra debajo) para el caso de incorporación puntual (inyección) de 1 Bq de U en la sangre en t=0. Utilice los coeffs. de transferencia de la Tabla 2, cuya numeración de muestra en la tabla 2.



**Table 1.- Compartment numbering**

Compartment	Number
Plasma	1 {Plasma,1}
RBC	2 {RBC,2}
ST0	3 {ST0,3}
ST1	4 {ST1,4}
ST2	5 {ST2,5}
Liver1	6 {Liver1,6}
Liver2	7 {Liver2,7}
KidneysUrinarypath	8 {KidneysUrinarypath,8}
KidneysOtherkidneytissue	9 {KidneysOtherkidneytissue,9}
Trabecularbonesurface	10 {Trabecularbonesurface,10}
Exchtrabecularbonevolume	11 {Exchtrabecularbonevolume,11}
Nonexchtrabecularbonevolume	12 {Nonexchtrabecularbonevolume,12}
Corticalbonesurface	13 {Corticalbonesurface,13}
Exhcorticalbonevolume	14 {Exhcorticalbonevolume,14}
Nonexhcorticalbonevolume	15 {Nonexhcorticalbonevolume,15}
RCcontent	16 {RCcontent,16}
LCcontent	17 {LCcontent,17}
RScontent	18 {RScontent,18}
Urinarybladdercontent	19 {Urinarybladdercontent,19}
Faeces	20 {Faeces,20}
Urine	21 {Urine,21}

□ **Tabla 2**





## □ Salida (La mostramos parcialmente)

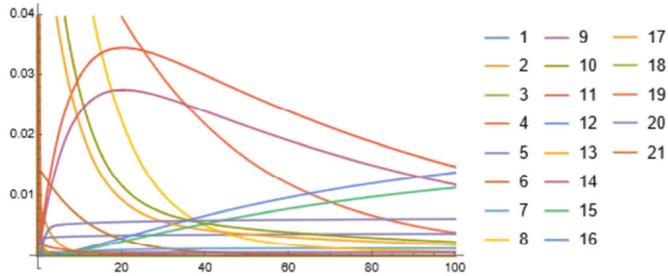
## Differential equation

$$\begin{aligned}
 x_1'(t) &= -34.9897 x_1(t) + 0.347 x_2(t) + 8.32 x_3(t) + 0.0347 x_4(t) + 0.000019 x_5(t) + 0.092 x_6(t) + 0.00019 x_7(t) + 0.00038 x_8(t) + 0.0693 x_{10}(t) + 0.000493 x_{12}(t) + 0.0693 x_{13}(t) + 0.0000821 x_{15}(t) \\
 x_2'(t) &= 0.245 x_1(t) - 0.347 x_2(t) + 0 \\
 x_3'(t) &= 10.5 x_1(t) - 8.32 x_3(t) + 0 \\
 x_4'(t) &= 1.63 x_1(t) - 0.0347 x_4(t) + 0 \\
 x_5'(t) &= 0.0735 x_1(t) - 0.000019 x_5(t) + 0 \\
 x_6'(t) &= 0.367 x_1(t) - 0.09893 x_6(t) + 0 \\
 x_7'(t) &= 0.00693 x_6(t) - 0.00019 x_7(t) + 0 \\
 x_8'(t) &= 2.94 x_1(t) - 0.099 x_8(t) + 0 \\
 x_9'(t) &= 0.0122 x_1(t) - 0.00038 x_9(t) + 0 \\
 x_{10}'(t) &= 2.04 x_1(t) - 0.1386 x_{10}(t) + 0.0173 x_{11}(t) + 0 \\
 x_{11}'(t) &= 0.0693 x_{10}(t) - 0.02308 x_{11}(t) + 0 \\
 x_{12}'(t) &= 0.00578 x_{11}(t) - 0.000493 x_{12}(t) + 0 \\
 x_{13}'(t) &= 1.63 x_1(t) - 0.1386 x_{13}(t) + 0.0173 x_{14}(t) + 0 \\
 x_{14}'(t) &= 0.0693 x_{13}(t) - 0.02308 x_{14}(t) + 0 \\
 x_{15}'(t) &= 0.00578 x_{14}(t) - 0.0000821 x_{15}(t) + 0 \\
 x_{16}'(t) &= 0.122 x_1(t) - 2. x_{16}(t) + 0 \\
 x_{17}'(t) &= 2. x_{16}(t) - 2.01 x_{17}(t) + 0 \\
 x_{18}'(t) &= 2.01 x_{17}(t) - 2.02 x_{18}(t) + 0 \\
 x_{19}'(t) &= 15.43 x_1(t) + 0.099 x_8(t) - 12. x_{19}(t) + 0 \\
 x_{20}'(t) &= 2.02 x_{18}(t) + 0 \\
 x_{21}'(t) &= 12. x_{19}(t) + 0 \\
 x_1(0) &= 1 \\
 x_2(0) &= 0 \\
 x_3(0) &= 0 \\
 x_4(0) &= 0 \\
 x_5(0) &= 0 \\
 x_6(0) &= 0 \\
 x_7(0) &= 0 \\
 x_8(0) &= 0 \\
 x_9(0) &= 0 \\
 x_{10}(0) &= 0 \\
 x_{11}(0) &= 0 \\
 x_{12}(0) &= 0 \\
 x_{13}(0) &= 0 \\
 x_{14}(0) &= 0 \\
 x_{15}(0) &= 0 \\
 x_{16}(0) &= 0 \\
 x_{17}(0) &= 0 \\
 x_{18}(0) &= 0 \\
 x_{19}(0) &= 0 \\
 x_{20}(0) &= 0
 \end{aligned}$$

Solution

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &\rightarrow 0.909248 e^{-37.9495 t} + 0.0900171 e^{-5.378 t} + 0.000132871 e^{-0.343637 t} + 0.000364895 e^{-0.138844 t} + 0.0000803428 e^{-0.0972756 t} + 0.000110103 e^{-0.0321935 t} + 0.000 \\
 x_2(t) &\rightarrow -0.00592423 e^{-37.9495 t} - 0.00438365 e^{-5.378 t} + 0.0096794 e^{-0.343637 t} + 0.000429482 e^{-0.138844 t} + 0.0000788229 e^{-0.0972756 t} + 0.0000856882 e^{-0.0321935 t} + 0. \\
 x_3(t) &\rightarrow -0.322216 e^{-37.9495 t} + 0.321271 e^{-5.378 t} + 0.00017491 e^{-0.343637 t} + 0.00046832 e^{-0.138844 t} + 0.000102594 e^{-0.0972756 t} + 0.000139492 e^{-0.0321935 t} + 0.000058 \\
 x_4(t) &\rightarrow -0.0390896 e^{-37.9495 t} - 0.0274601 e^{-5.378 t} - 0.00070105 e^{-0.343637 t} - 0.00571113 e^{-0.138844 t} - 0.00209281 e^{-0.0972756 t} + 0.0716009 e^{-0.0321935 t} + 0.0034221 \\
 x_5(t) &\rightarrow -0.00176102 e^{-37.9495 t} - 0.00123025 e^{-5.378 t} - 0.0000284212 e^{-0.343637 t} - 0.000193191 e^{-0.138844 t} - 0.0000607177 e^{-0.0972756 t} - 0.000251521 e^{-0.0321935 t} - \\
 x_6(t) &\rightarrow -0.00881609 e^{-37.9495 t} - 0.00625797 e^{-5.378 t} - 0.000199274 e^{-0.343637 t} - 0.00335513 e^{-0.138844 t} + 0.0178231 e^{-0.0972756 t} + 0.000605482 e^{-0.0321935 t} + 0.000 \\
 x_7(t) &\rightarrow 1.60992 \times 10^{-6} e^{-37.9495 t} + 8.06419 \times 10^{-6} e^{-5.378 t} + 4.02091 \times 10^{-6} e^{-0.343637 t} + 0.000167691 e^{-0.138844 t} - 0.00127222 e^{-0.0972756 t} - 0.00013111 e^{-0.0321935 t} + 0.000 \\
 x_8(t) &\rightarrow -0.0706249 e^{-37.9495 t} - 0.0501326 e^{-5.378 t} - 0.00159682 e^{-0.343637 t} - 0.0269248 e^{-0.138844 t} + 0.00585096 e^{-0.099 t} + 0.136983 e^{-0.0972756 t} + 0.00484538 e^{-0.0321935 t} \\
 x_9(t) &\rightarrow -0.000292308 e^{-37.9495 t} - 0.000204218 e^{-5.378 t} - 4.72249 \times 10^{-6} e^{-0.343637 t} - 0.0000321508 e^{-0.138844 t} - 0.0000101159 e^{-0.0972756 t} - 0.0000422228 e^{-0.0321935 t} \\
 x_{10}(t) &\rightarrow -0.0490564 e^{-37.9495 t} - 0.0350503 e^{-5.378 t} - 0.00134655 e^{-0.343637 t} + 0.0736112 e^{-0.138844 t} + 0.00285127 e^{-0.0972756 t} + 0.000943908 e^{-0.0321935 t} + 0.00803 \\
 x_{11}(t) &\rightarrow 0.000089637 e^{-37.9495 t} + 0.000453599 e^{-5.378 t} + 0.000291107 e^{-0.343637 t} - 0.044066 e^{-0.138844 t} - 0.00266314 e^{-0.0972756 t} - 0.00717757 e^{-0.0321935 t} + 0.053 \\
 x_{12}(t) &\rightarrow -1.36526 \times 10^{-8} e^{-37.9495 t} - 4.87549 \times 10^{-7} e^{-5.378 t} - 4.90347 \times 10^{-6} e^{-0.343637 t} + 0.00184098 e^{-0.138844 t} + 0.000159047 e^{-0.0972756 t} + 0.0013087 e^{-0.0321935 t} \\
 x_{13}(t) &\rightarrow -0.039197 e^{-37.9495 t} - 0.0280059 e^{-5.378 t} - 0.00107592 e^{-0.343637 t} + 0.0588168 e^{-0.138844 t} + 0.00227822 e^{-0.0972756 t} + 0.000754201 e^{-0.0321935 t} + 0.006416 \\
 x_{14}(t) &\rightarrow 0.0000716217 e^{-37.9495 t} + 0.000362434 e^{-5.378 t} + 0.0002326 e^{-0.343637 t} - 0.0352096 e^{-0.138844 t} - 0.0021279 e^{-0.0972756 t} - 0.00573502 e^{-0.0321935 t} + 0.04236 \\
 x_{15}(t) &\rightarrow -1.09086 \times 10^{-8} e^{-37.9495 t} - 3.89531 \times 10^{-7} e^{-5.378 t} - 3.91329 \times 10^{-6} e^{-0.343637 t} + 0.00146662 e^{-0.138844 t} + 0.000126544 e^{-0.0972756 t} + 0.001032229 e^{-0.0321935 t} \\
 x_{16}(t) &\rightarrow -0.00308567 e^{-37.9495 t} - 0.00325106 e^{-5.378 t} + 0.00628815 e^{-2 t} + 9.78667 \times 10^{-6} e^{-0.343637 t} + 0.0000239191 e^{-0.138844 t} + 5.15147 \times 10^{-6} e^{-0.0972756 t} + 6.8 \\
 x_{17}(t) &\rightarrow 0.000171715 e^{-37.9495 t} + 0.00193055 e^{-5.378 t} - 1.25979 e^{-2.01 t} + 1.25763 e^{-2 t} + 0.0000117461 e^{-0.343637 t} + 0.0000255661 e^{-0.138844 t} + 5.38653 \times 10^{-6} e^{-0.0972756 t} \\
 x_{18}(t) &\rightarrow -9.60622 \times 10^{-8} e^{-37.9495 t} - 0.00115557 e^{-5.378 t} + 126.826 e^{-2.02 t} - 253.217 e^{-2.01 t} + 126.392 e^{-2 t} + 0.0000140839 e^{-0.343637 t} + 0.0000273172 e^{-0.138844 t} \\
 x_{19}(t) &\rightarrow -0.540384 e^{-37.9495 t} + 0.329424 e^{-12 t} + 0.209 e^{-5.378 t} + 0.000162325 e^{-0.343637 t} + 0.000249956 e^{-0.138844 t} + 0.000048672 e^{-0.099 t} + 0.0012435 e^{-0.0972756 t} \\
 x_{20}(t) &\rightarrow 0.00659745 + 5.11326 \times 10^{-7} e^{-37.9495 t} + 0.000434037 e^{-5.378 t} - 126.826 e^{-2.02 t} + 254.477 e^{-2.01 t} - 127.656 e^{-2 t} - 0.0000827894 e^{-0.343637 t} - 0.00039743 \\
 x_{21}(t) &\rightarrow 0.993403 + 0.170875 e^{-37.9495 t} - 0.329424 e^{-12 t} - 0.466345 e^{-5.378 t} - 0.00566848 e^{-0.343637 t} - 0.0216032 e^{-0.138844 t} - 0.00589963 e^{-0.099 t} - 0.153399 e^{-0.0972756 t}
 \end{aligned}$$

Plot



Us (disintegrations in each compartment during a time t)

	day	10*day	100*day	18250*day
1	3568.75	3883.	4365.63	4640.05
2	675.54	2606.9	3078.98	3276.11
3	4479.93	4897.15	5509.26	5855.83
4	5171.96	51174.4	195447.	217959.
5	236.986	2719.5	30605.3	5.21635 10 <sup>6</sup>
6	1130.66	8719.48	16122.	17213.1
7	3.68953	340.269	9505.02	606301.
8	9057.29	69830.9	129061.	137795.
9	39.3299	450.606	4991.7	148627.
10	6173.49	42183.3	89366.7	109233.
11	201.155	15813.3	212838.	327976.
12	0.368934	335.451	66030.6	3.84105 10 <sup>6</sup>
13	4932.74	33705.3	71405.8	87279.
14	160.727	12635.1	170062.	262059.
15	0.294814	268.323	53492.1	1.42152 10 <sup>7</sup>
16	179.769	236.184	266.255	283.043
17	116.17	234.306	264.882	281.635
18	59.7226	232.418	263.522	280.24
19	4643.95	5563.58	6678.01	7103.13
20	37.7073	3811.51	50053.1	1.02367 10 <sup>7</sup>
21	45529.8	604359.	7.52059 10 <sup>6</sup>	1.54135 10 <sup>9</sup>