

Nuevo esquema de generación de la escala de tiempo UTC(CNM)

Nélida Díaz, Francisco Jiménez y Mauricio López
División de Tiempo y Frecuencia

Resumen

La escala de Tiempo Universal Coordinado del CENAM, UTC(CNM), se genera desde marzo de 1996 sin interrupciones y a partir del día 53 000 de la fecha juliana modificada (MJD) - 27 de diciembre del 2003 - la diferencias de tiempo $|\text{UTC}-\text{UTC}(\text{CNM})|$ son menores que 50 ns durante más del 90% del tiempo, y siempre menores que 80 ns. La estabilidad del UTC(CNM) es de 4.3 ns para tiempos de promediación de 5 días y de 30 ns para un año. Si bien el desempeño del UTC(CNM) es satisfactorio, en breve el UTC(CNM) se generará bajo un nuevo esquema que permitirá mejorar su desempeño. Con el nuevo esquema se espera que la estabilidad del UTC(CNM) sea de 2 ns para tiempos de promediación de 5 días y de 15 ns para un año, mientras que las diferencias de tiempo $|\text{UTC}-\text{UTC}(\text{CNM})|$ se mantendrán menores a 25 ns. Desde hace dos años se genera la escala la escala de tiempo UTC(CNM2) a efecto de probar el algoritmo desarrollado en el CENAM para la generación escalas de tiempo promediadas. En el seminario se muestran los resultados de la comparación internacional del UTC(CNM2) con el NIST, el NRC así como con el sistema GPS. Los resultados muestran que los objetivos que se han establecido para desempeño del UTC(CNM) son alcanzables. Se le ha notificado al BIPM que a partir del 1 de octubre, del 2009, a las 00h00 UTC, el UTC(CNM) se generará usando el algoritmo del CENAM para generar escalas de tiempo promediadas.

Progress in the generation of the UTC(CNM) in terms of a virtual clock

J M López-Romero and N Díaz-Muñoz

Metrologia **45** (2008) S59–S65



Tiempo y Frecuencia

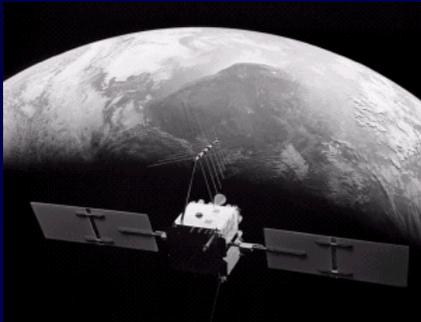
Contenido

1. La importancia de las escalas de tiempo
2. El UTC(CNM)
3. Nuevo esquema de generación del UTC(CNM)
4. Resultados de la comparación de la nueva escala de tiempo con otras escalas

Contenido

- 1. La importancia de las escalas de tiempo**
2. El UTC(CNM)
3. Nuevo esquema de generación del UTC(CNM)
4. Resultados de la comparación de la nueva escala de tiempo con otras escalas

Las escalas de tiempo de alto desempeño son indispensables para aplicaciones altamente demandantes



Navegación



Comunicaciones



Comparación de patrones primarios de frecuencia

Cosmic Rays on Earth
Slide created by Georgia A. de Nolfo
from PPT *Cosmic Rays, for Elements 2002 Workshop*

► Cosmic Rays continually bombard the Earth. In fact, about 100,000 cosmic rays will pass through a person every hour!



Cosmic Rays

Modelos fundamentales de la física

Algunos números conservadores relacionados con escalas de tiempo

1. Número de mediciones de tiempo en México por año:

$\geq 10^{13}$

2. Monto económico anual asociado a las mediciones de tiempo en México:

$\geq 10^{11}$ pesos

3. Inversión mundial para la generación de escalas de tiempo:

$\geq 10^7$ dólares

4. Ahorro en México por cada peso invertido en la generación y diseminación del UTC(CNM):

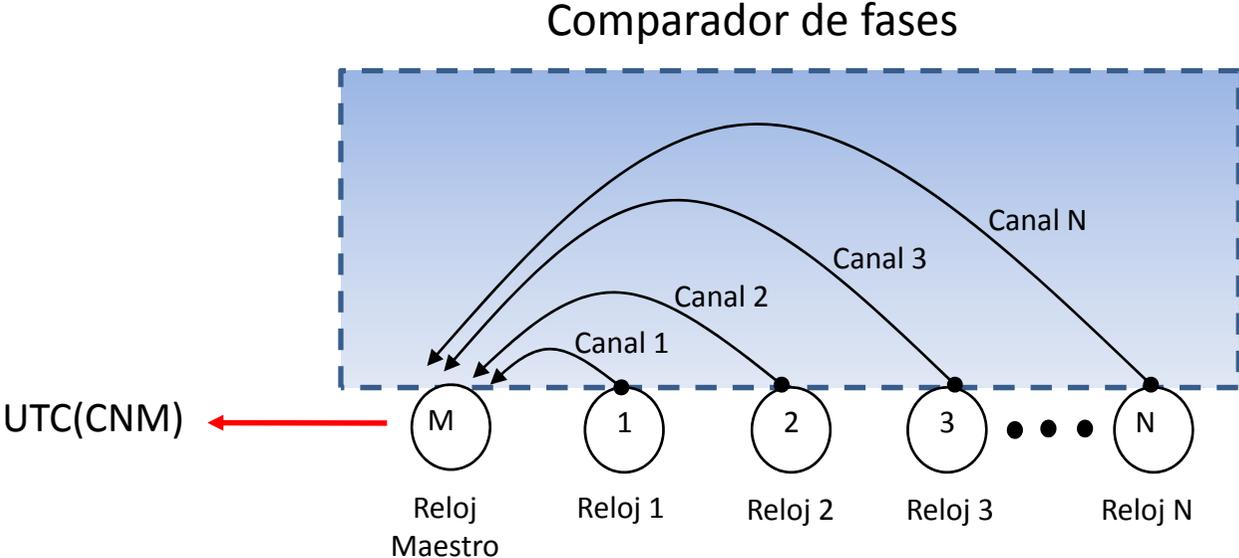
$\geq 10^3$



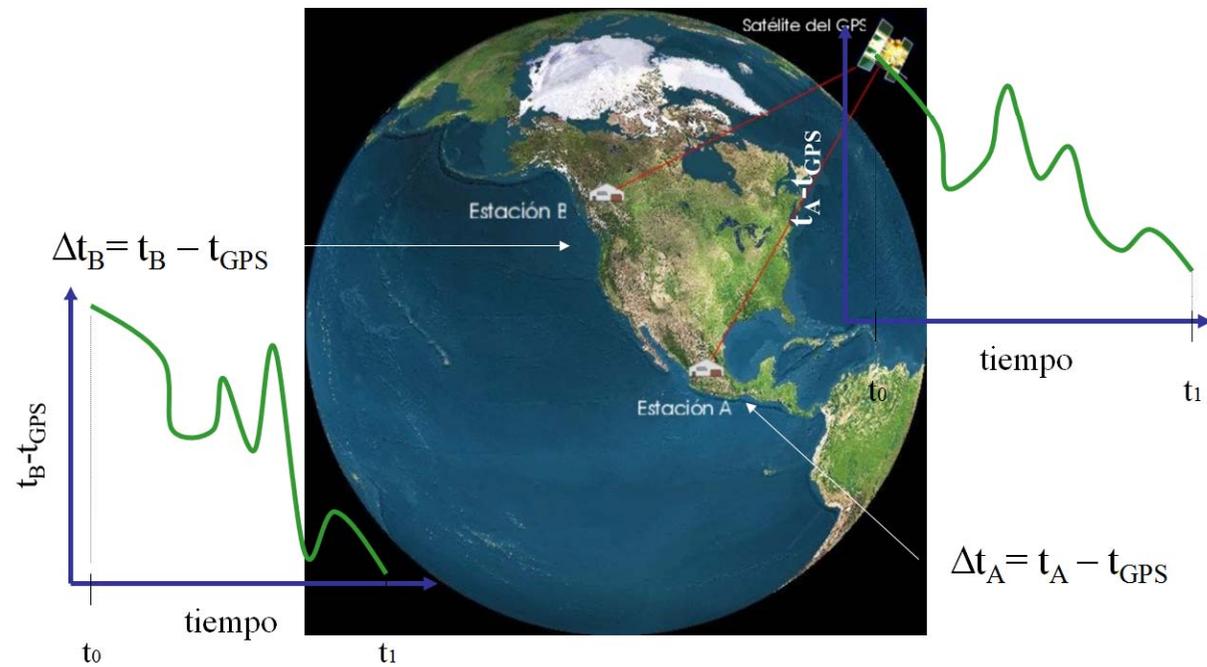
Contenido

1. La importancia de las escalas de tiempo
- 2. El UTC(CNM)**
3. Nuevo esquema de generación del UTC(CNM)
4. Resultados de la comparación de la nueva escala de tiempo con otras escalas

Generación de la escala de tiempo UTC(CNM)

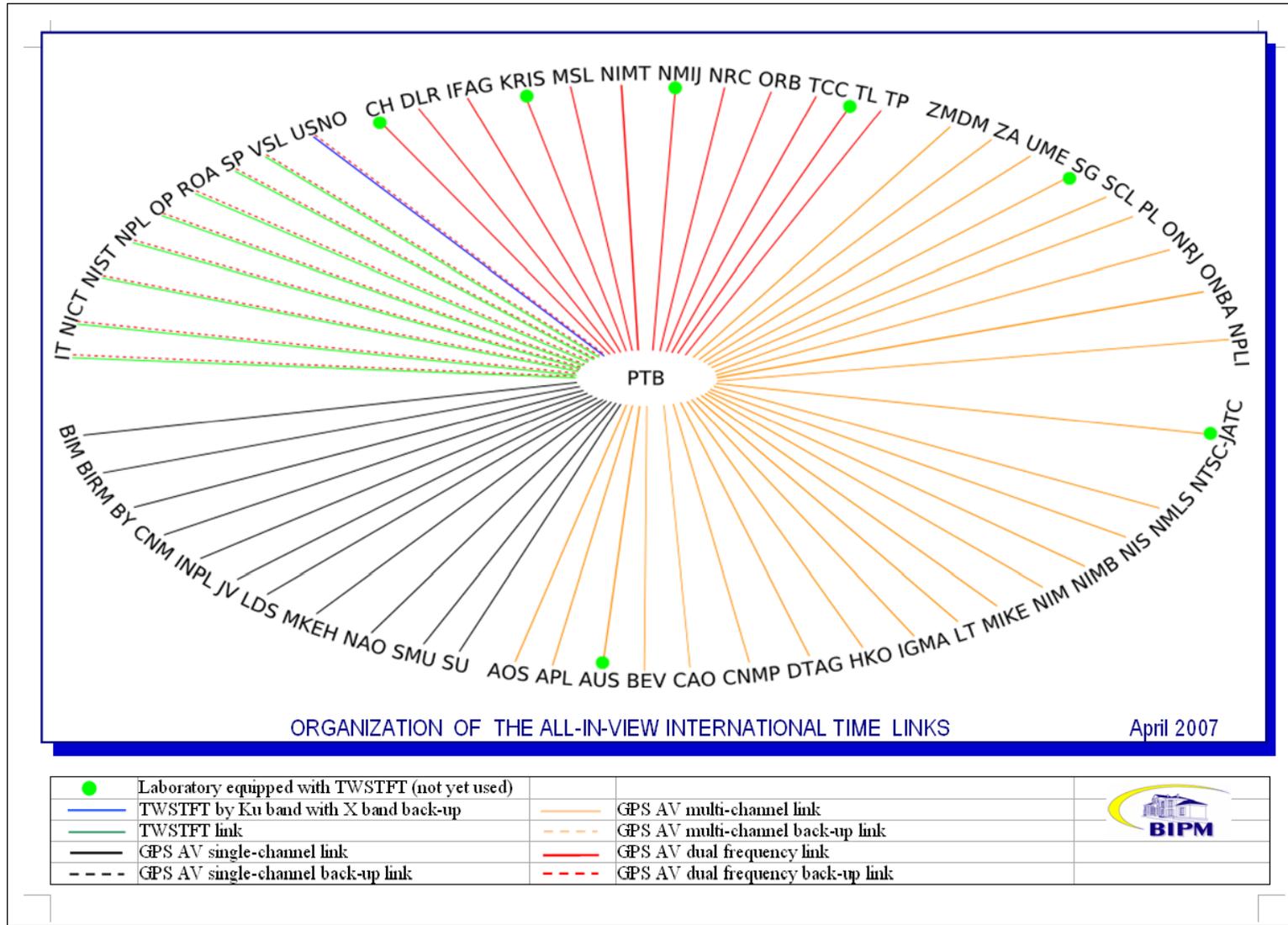


Comparación de la escala de tiempo UTC(CNM)

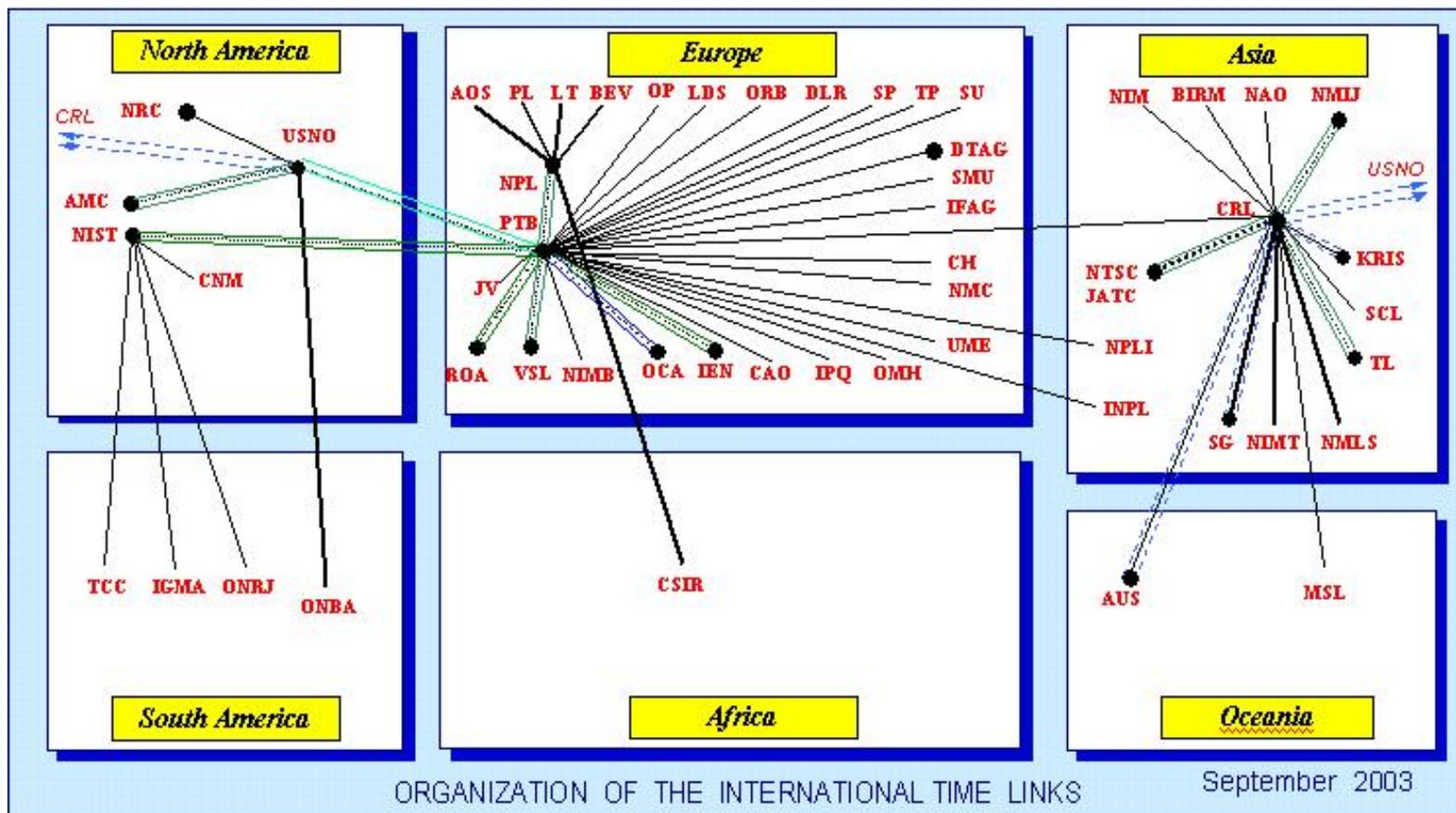


$$\Delta t_{BA} = \Delta t_B - \Delta t_A = (t_B - t_{GPS}) - (t_A - t_{GPS}) = t_B - t_A + \delta \epsilon$$

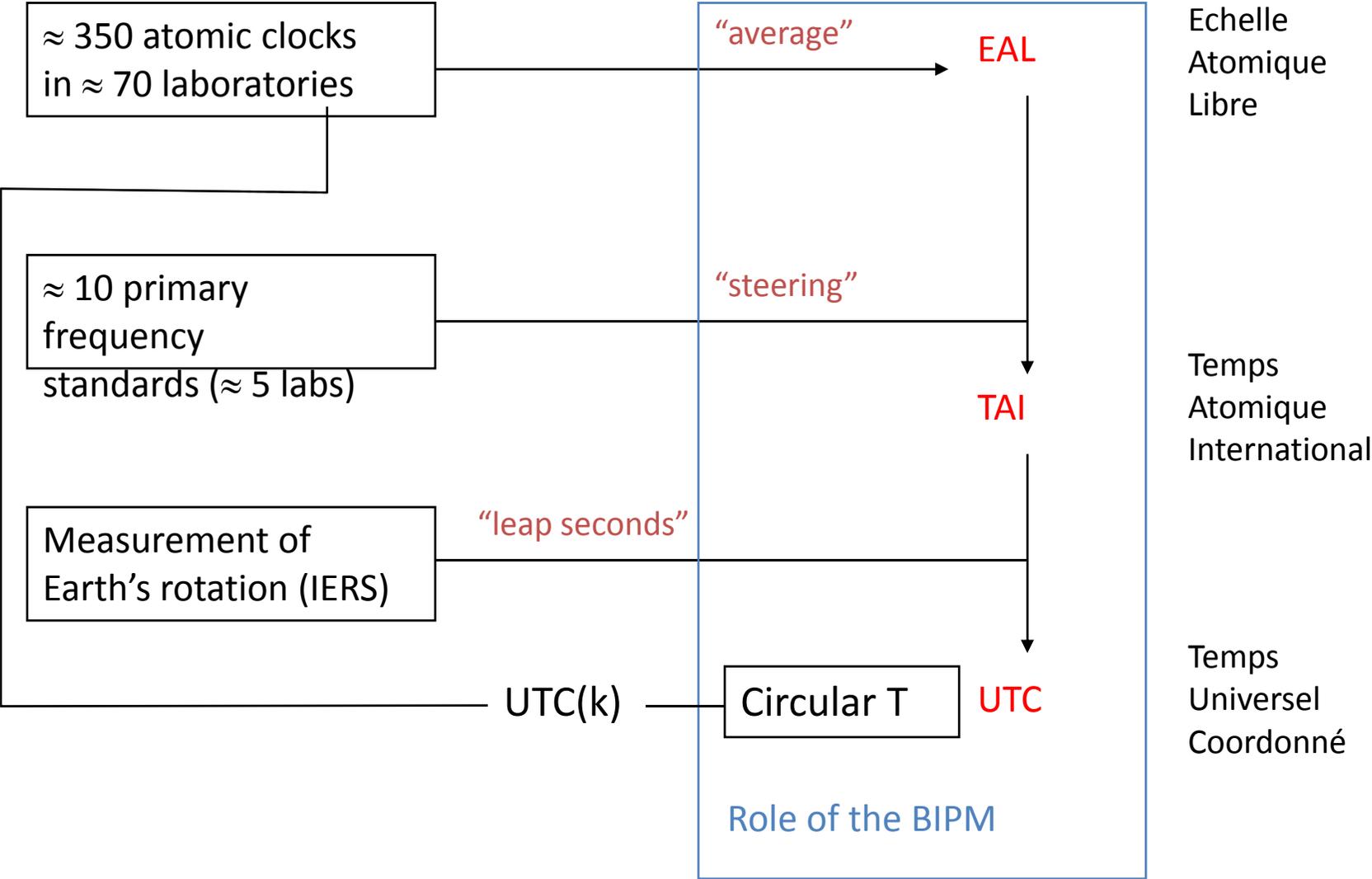
Comparación de la escala de tiempo UTC(CNM)

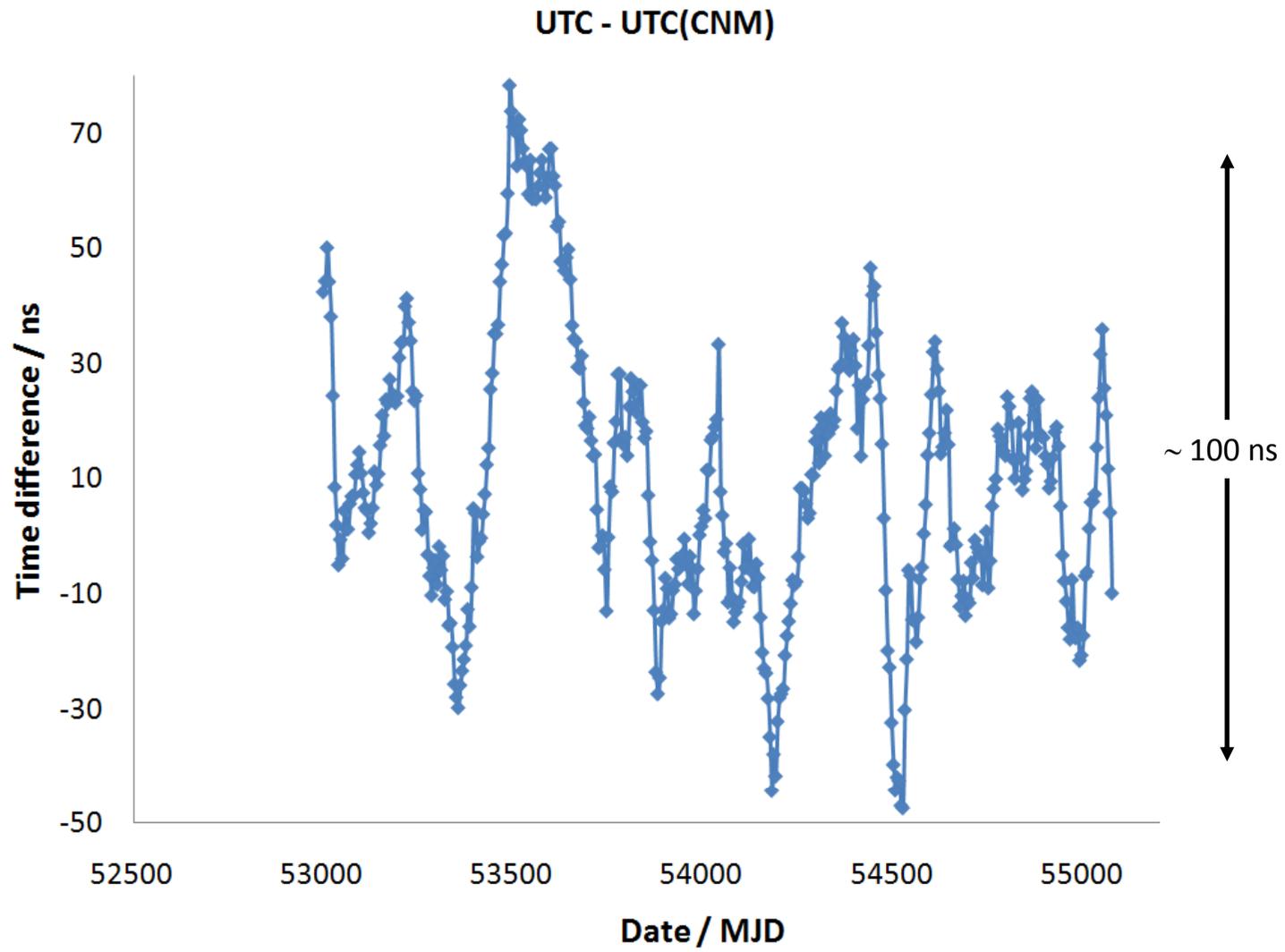


Comparación de la escala de tiempo UTC(CNM)

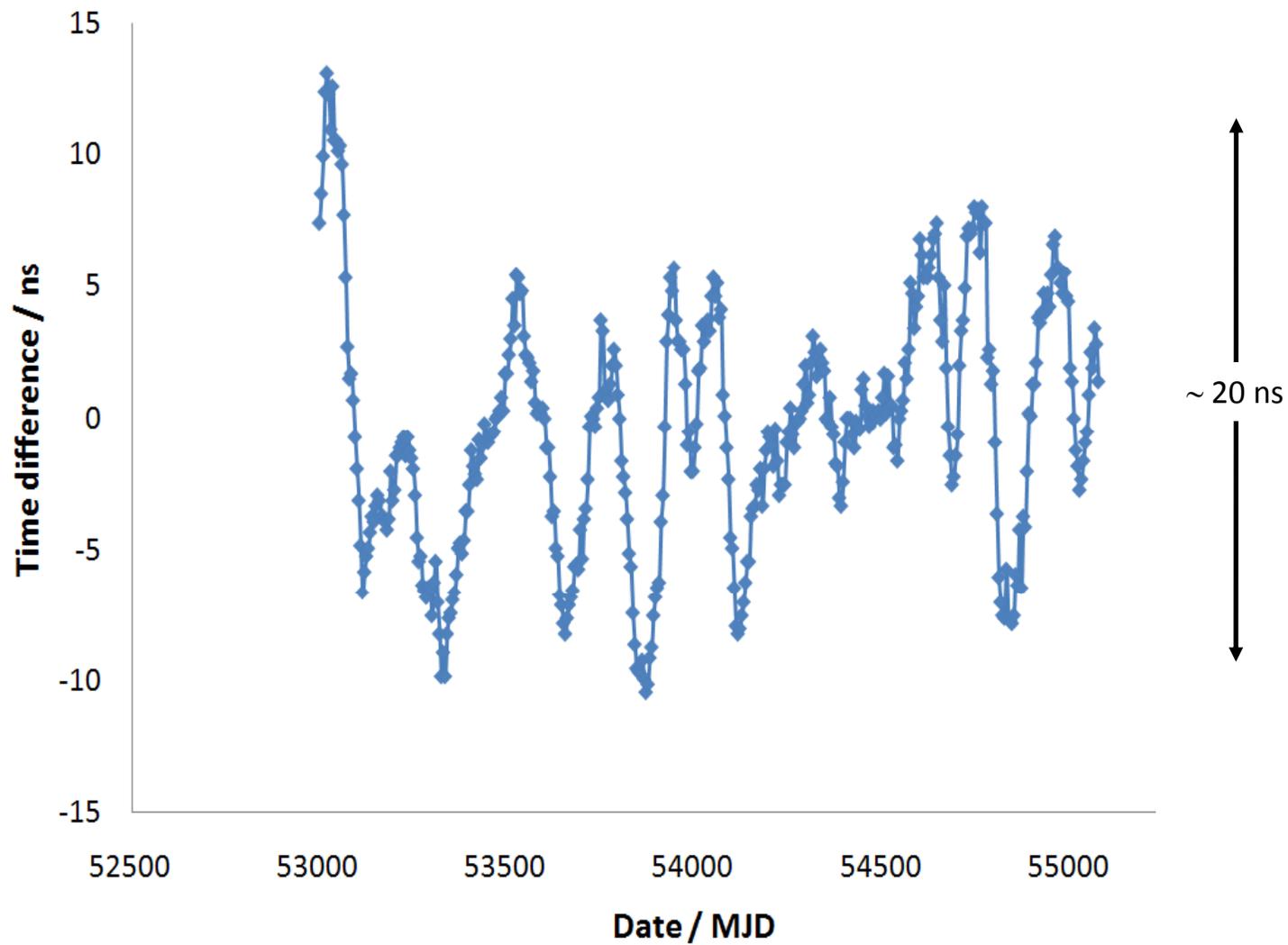


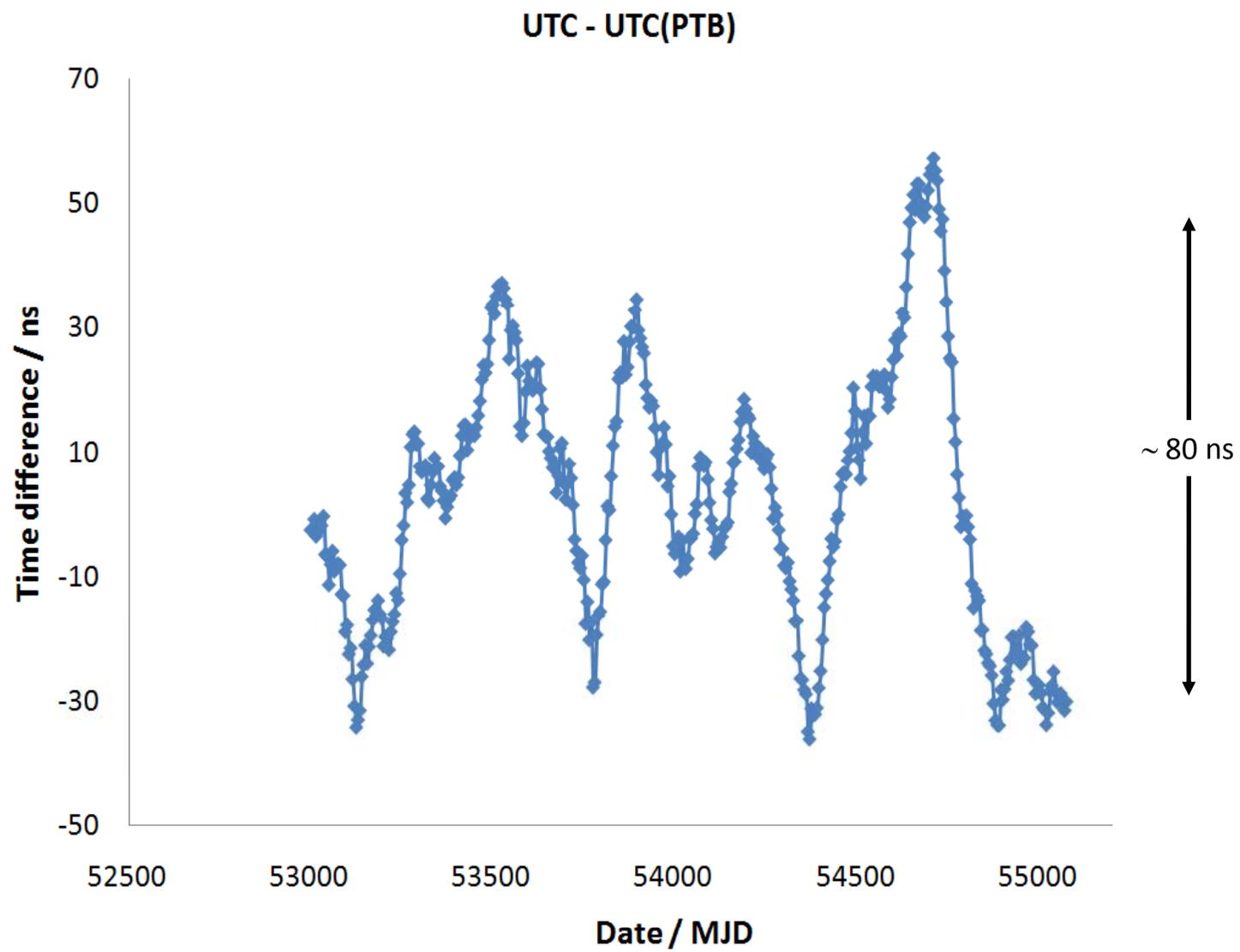
Elaboration of TAI and UTC



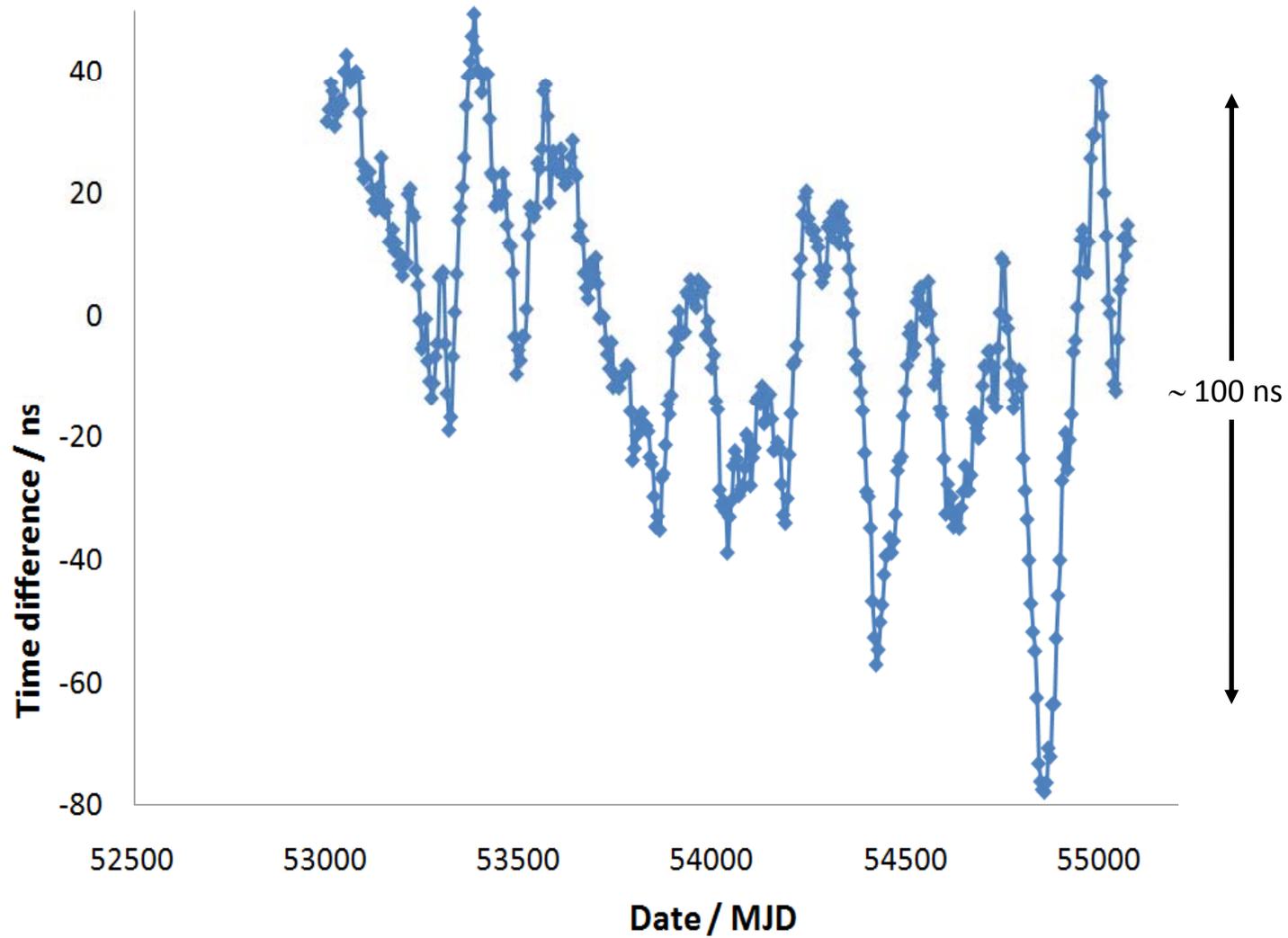


UTC - UTC(USNO)

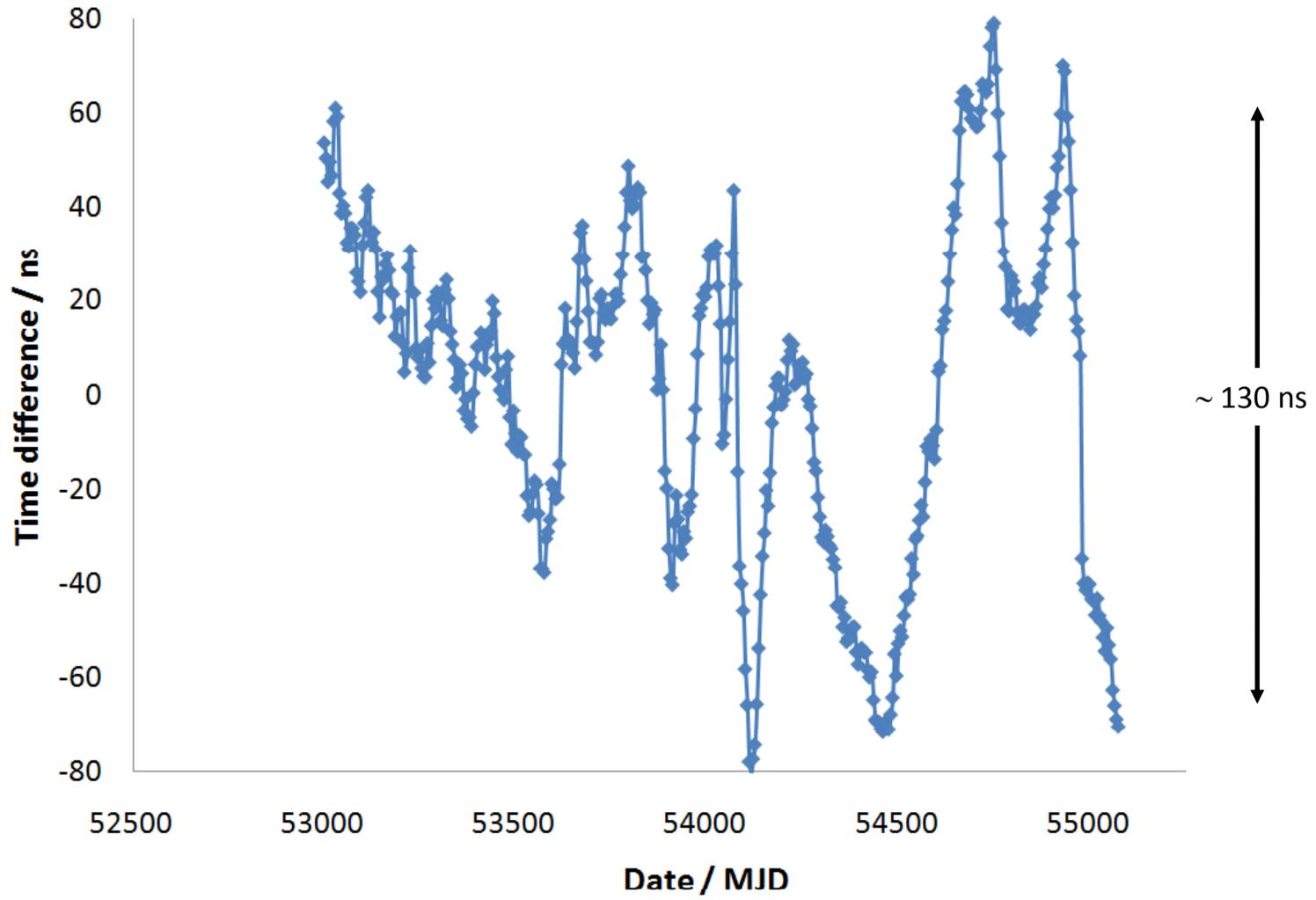




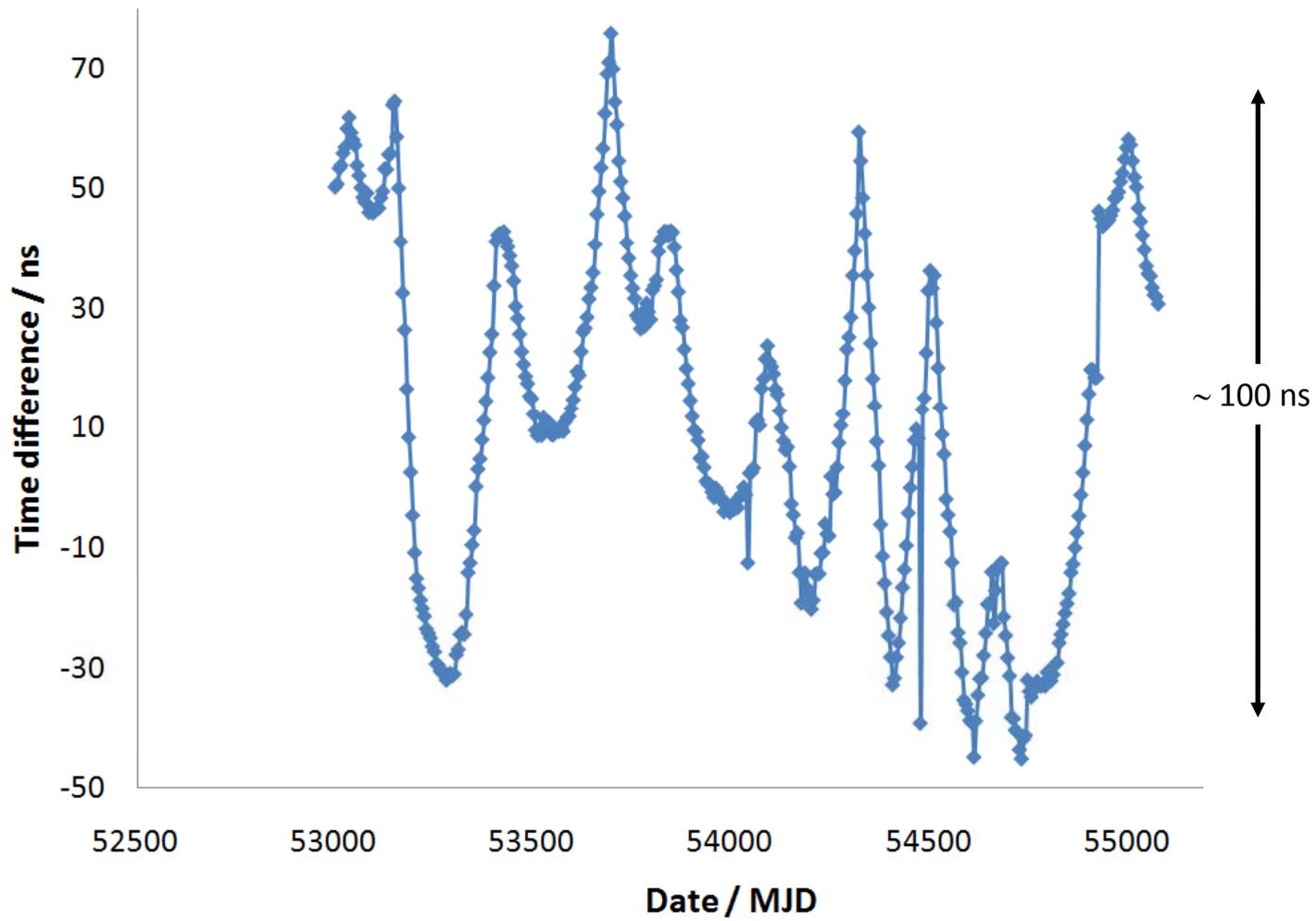
UTC - UTC(OP)

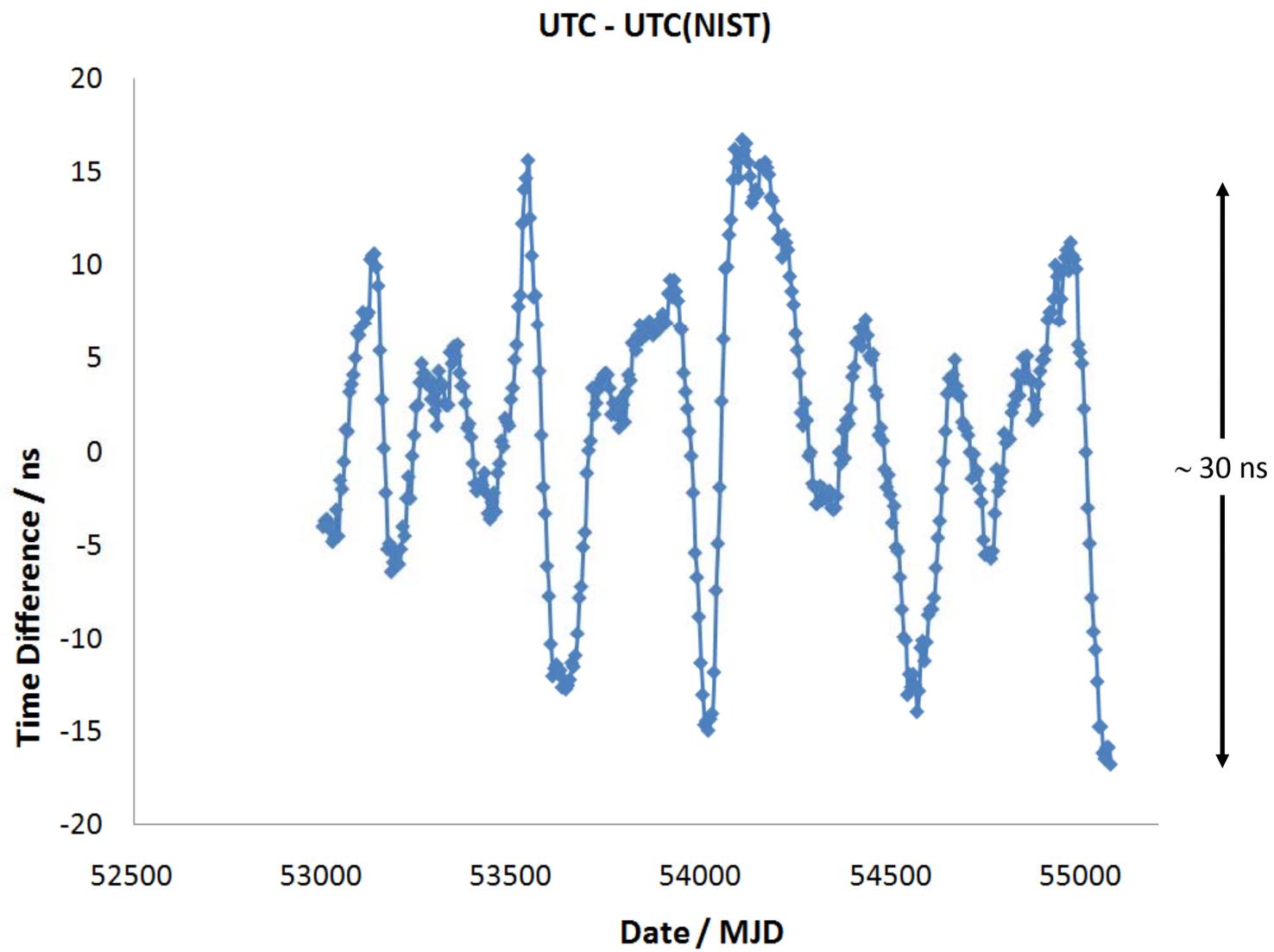


UTC - UTC(NRC)

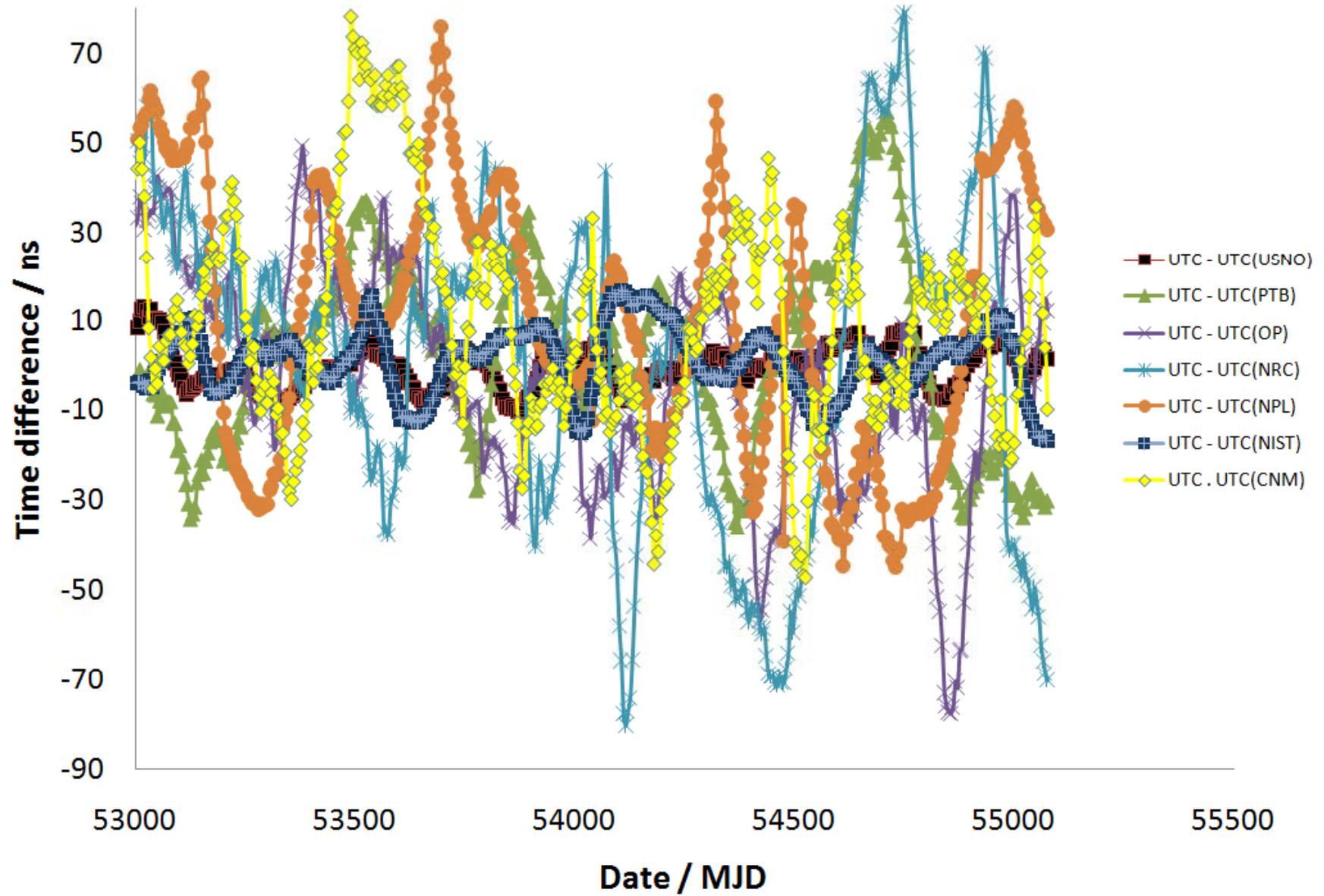


UTC - UTC(NPL)





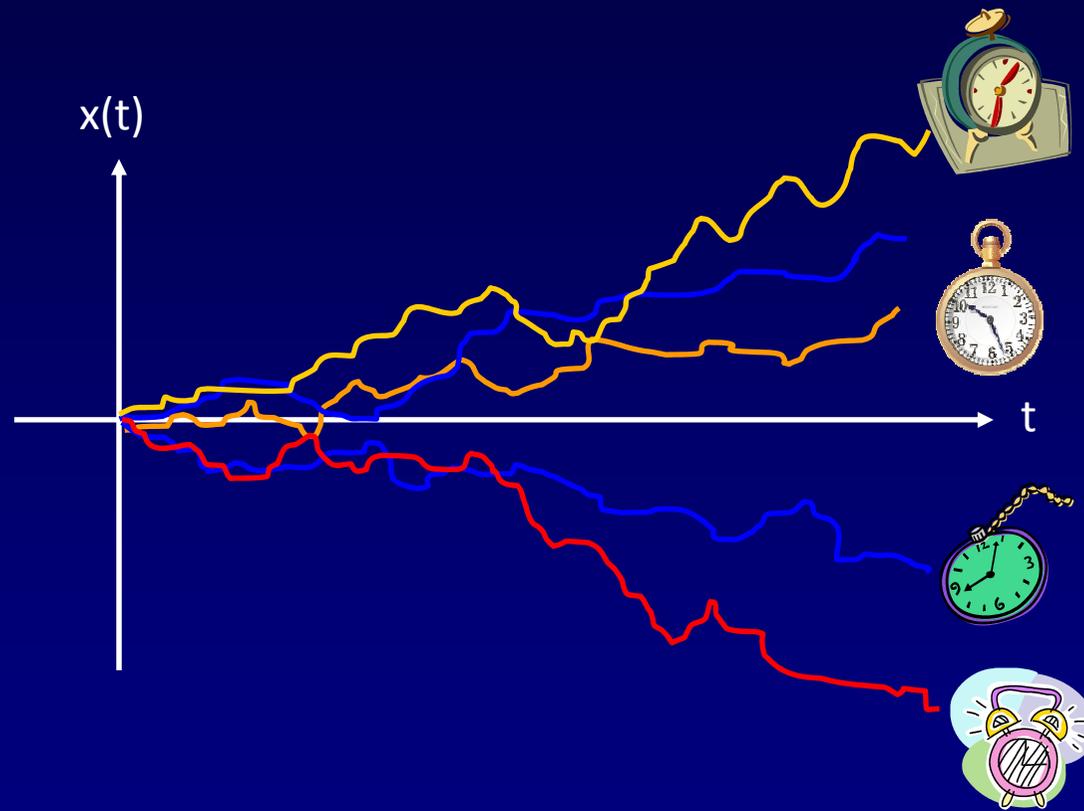
UTC - UTC(k)



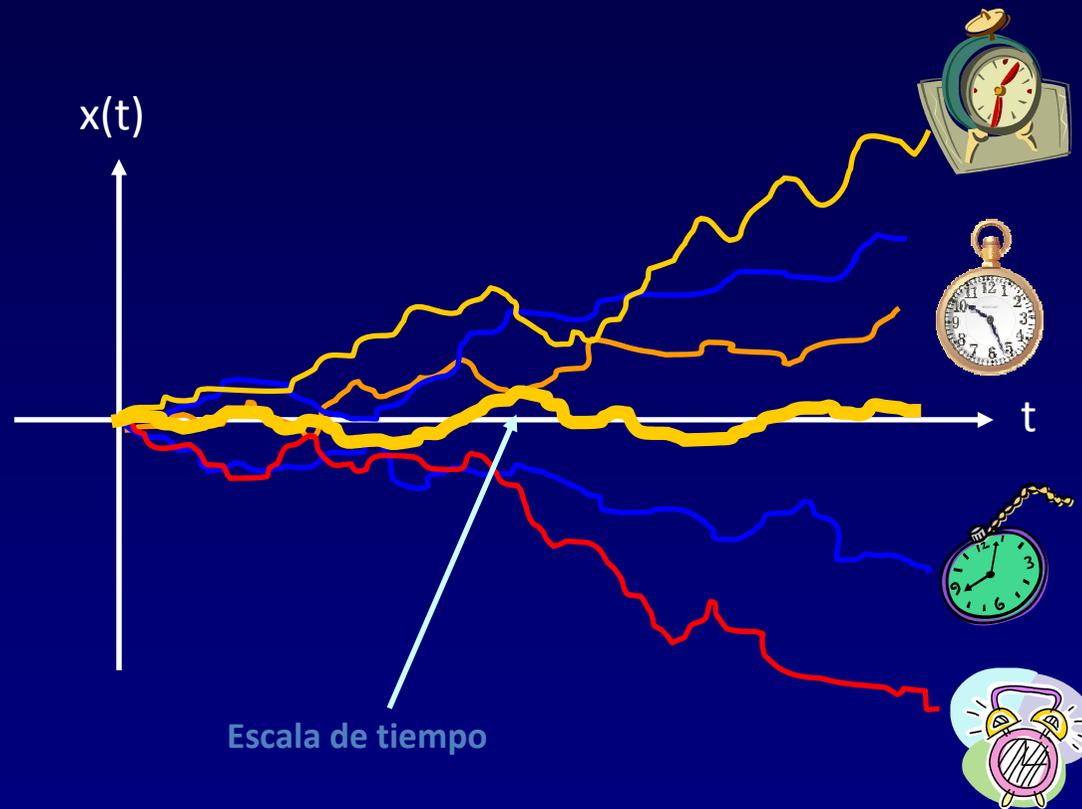
Contenido

1. La importancia de las escalas de tiempo
2. El UTC(CNM)
- 3. Nuevo esquema de generación del UTC(CNM)**
4. Resultados de la comparación de la nueva escala de tiempo con otras escalas

Concepto de escala de tiempo promediada



Concepto de escala de tiempo promediada



Modelo matemático para un reloj

Para la señal del reloj: $V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \sin[2\pi\nu_0 t + \phi(t)]$


Variables aleatorias

Con

$$\left| \frac{\varepsilon(t)}{V_0} \right| \ll 1$$

$$\nu(t) = \nu_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi(t)$$

$$\left| \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d}{dt} \phi(t) \right| \ll 1$$

Modelo matemático para un reloj

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \sin[2\pi\nu_0 t + \phi(t)]$$

Desviación fraccional de frecuencia

$$y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi(t)$$

Desviación temporal

$$x(t) = \frac{\phi(t)}{2\pi\nu_0}$$

$$y(t) = \frac{d}{dt} x(t)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{\tau} \int_{t_i}^{t_i + \tau} y(t) dt = \frac{1}{\tau} [x(t_i + \tau) - x(t_i)]$$

Frecuencia promedio en el intervalo $(t_i, t_i + \tau)$

Modelo matemático para un reloj

Predicción de la desviación fraccional de frecuencia

$$y(t) = y(t_0) + d_0(t - t_0) + \varepsilon(t)$$

Predicción de la desviación temporal

$$x(t) = x(t_0) + y(t_0) \times (t - t_0) + \frac{1}{2} d_0 (t - t_0)^2 + \psi(t)$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

1 reloj

Si $h(t)$ es el tiempo medido por un reloj al instante t entonces la escala de tiempo TA más simple puede ser definida de acuerdo a la relación

$$TA(t) = h(t)$$



$$TA(t) - h(t) = 0$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

2 relojes

$$TA(t) = \frac{1}{2} (h_1(t) + h_2(t))$$



$$TA(t) - \left[\frac{1}{2} (h_1(t) + h_2(t)) \right] = 0$$

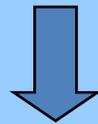


$$\sum_{i=1}^2 [TA(t) - h_i(t)] = 0$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

N relojes

$$TA(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(t)$$



$$TA(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(t) = 0$$



$$\sum_{i=1}^N [TA(t) - h_i(t)] = 0$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

N relojes con diferente peso

$$TA(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i h_i(t) \quad \Rightarrow \quad TA(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i h_i(t) = 0$$



$$\sum_{i=1}^N \omega_i [TA(t) - h_i(t)] = 0$$

Con la restricción

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

El caso de N relojes con diferente peso

$$TA(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i h_i(t) \quad \Rightarrow \quad TA(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i h_i(t) = 0$$

$$\sum_{i=1}^N \omega_i [TA(t) - h_i(t)] = 0$$

Con la restricción

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$$

No es un observable

Modelo matemático para escalas de tiempo

$$TA(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i h_i(t)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i(\tau)} h_i(t)}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i(\tau)}}$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

$$TA(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i h_i(t)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i(\tau)} h_i(t)}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i(\tau)}}$$

La única información disponible experimentalmente es la diferencia de tiempo entre relojes

$$x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t) \quad \longleftarrow \text{Diferencia de tiempo entre el reloj } j \text{ y el reloj } i$$

Las diferencias de tiempo entre el reloj k y la escala TA es:

$$x_k(t) = TA(t) - h_k(t)$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

$$TA(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i h_i(t)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad \Rightarrow \quad TA(t) - h_k = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i [h_i(t) - h_k(t)]}{\sum_{i=1}^N \omega_i}$$

$$x_k(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i x_{ki}(t)}{\sum_{i=1}^N \omega_i}$$

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i x_{ki}(t)$$

Modelo matemático para escalas de tiempo

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i x_{ki}(t)$$

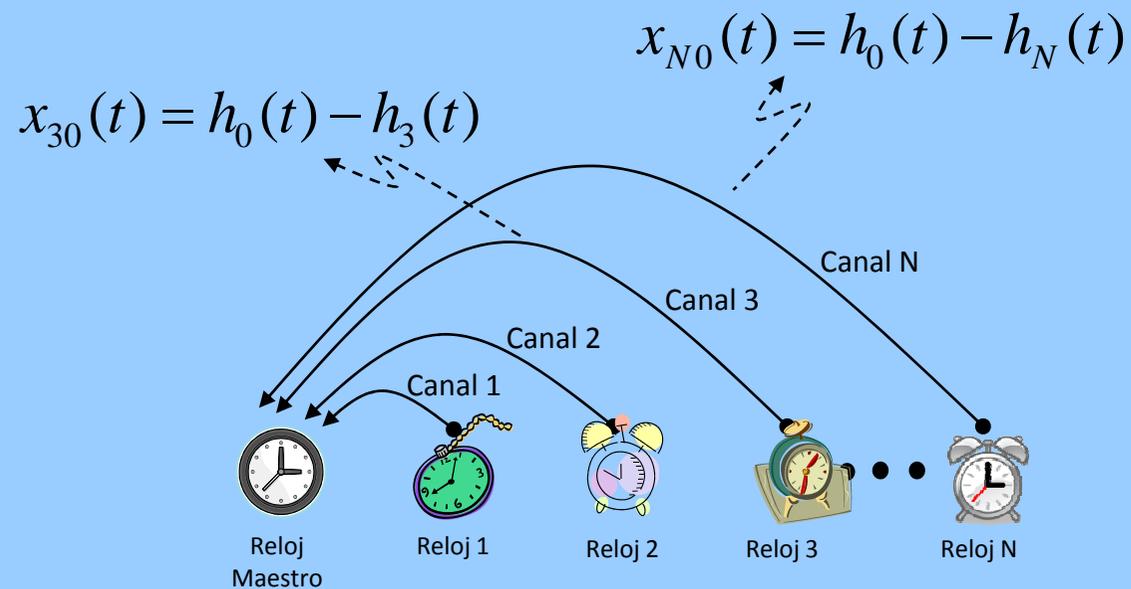
$$\widehat{X}_k(t + \tau) = X_k(t) + \left[Y_k(t) + \frac{D_k \tau}{2} \right] \tau$$

$$X_k(t + \tau) = \sum_{j=1}^N w_j \left[\widehat{X}_j(t + \tau) - X_{jk}(t + \tau) \right]$$

$$\widehat{Y}_k(t + \tau) = \frac{X_k(t + \tau) - X_k(t)}{\tau}$$

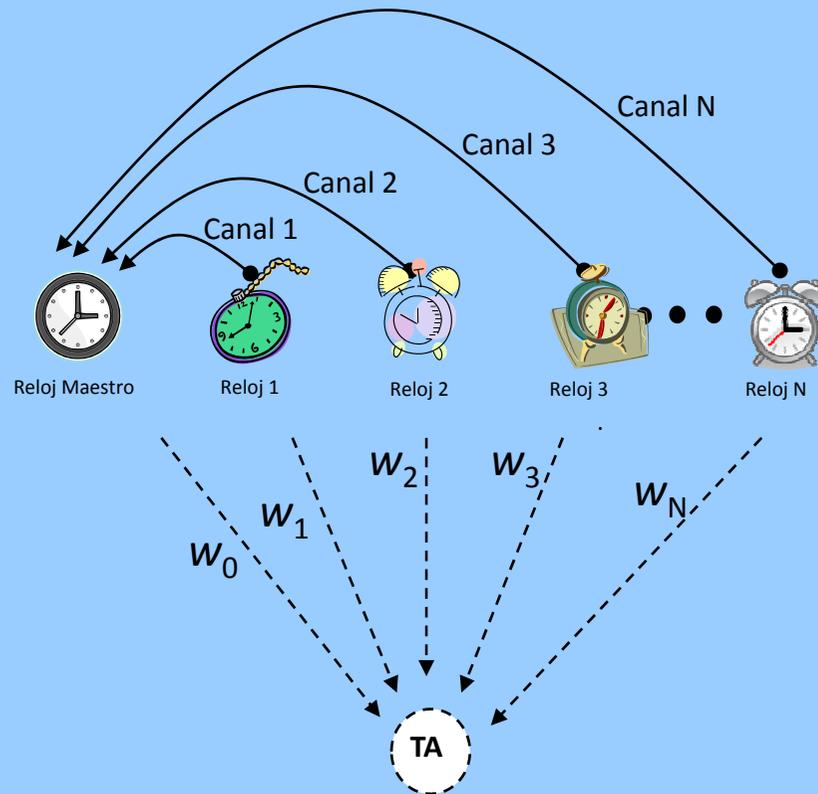
$$Y_k(t + \tau) = \frac{\widehat{Y}_k(t + \tau) + m_k Y_k(t)}{1 + m_k}$$

Experimento



$$x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t) = [h_0(t) - h_i(t)] - [h_0(t) - h_j(t)]$$

Experimento



$$\bar{X}_i(t + \tau) = X_i(t) + \left[Y_i(t) + \frac{D_i \tau}{2} \right] \tau$$

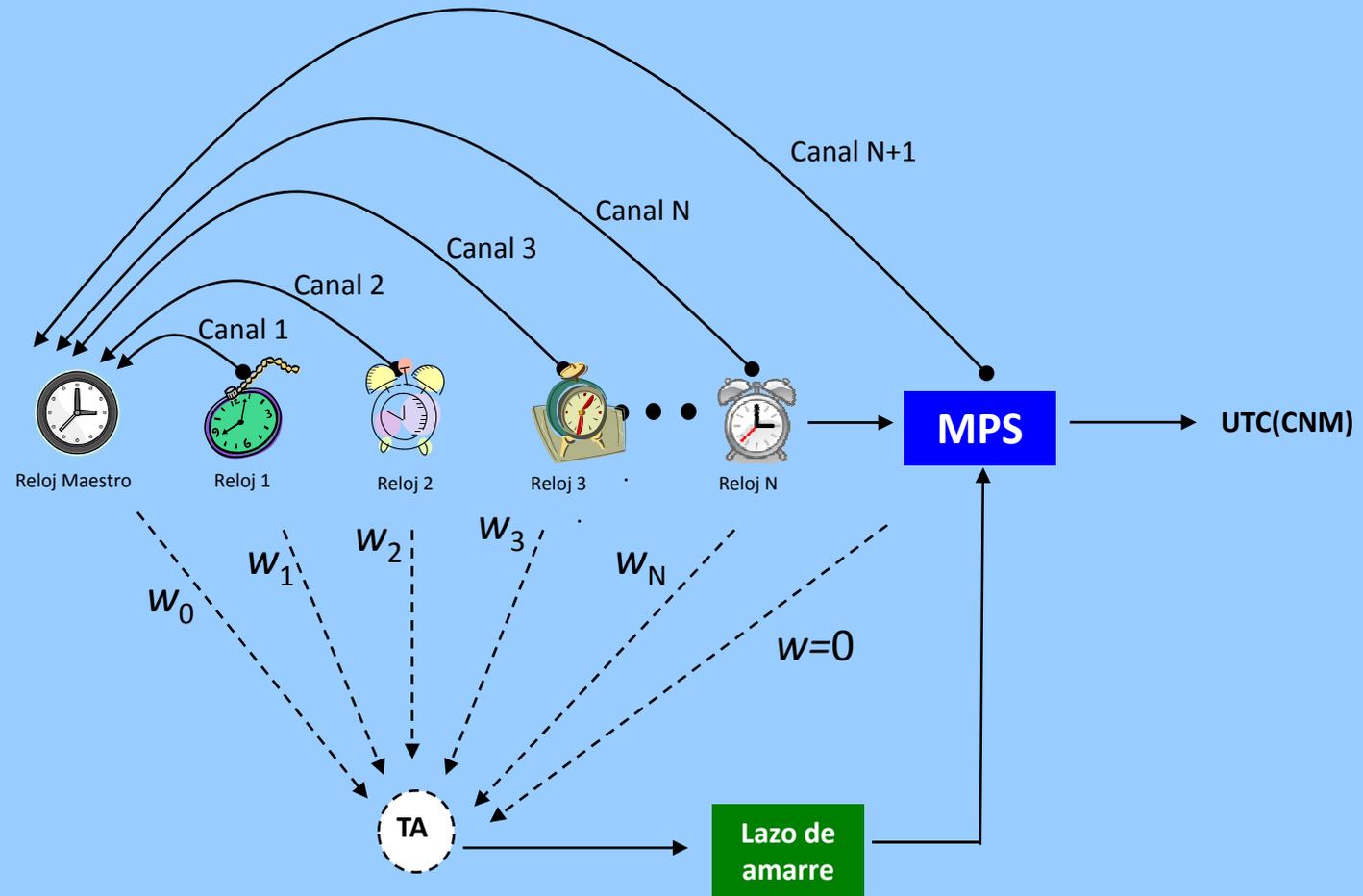
$$X_i(t + \tau) = \sum_{j=1}^N w_j [\bar{X}_j(t + \tau) - X_{ji}(t + \tau)]$$

$$\bar{Y}_i(t + \tau) = \frac{X_i(t + \tau) - X_i(t)}{\tau}$$

$$Y_i(t + \tau) = \frac{\bar{Y}_i(t + \tau) + m_i Y_i(t)}{1 + m_i}$$

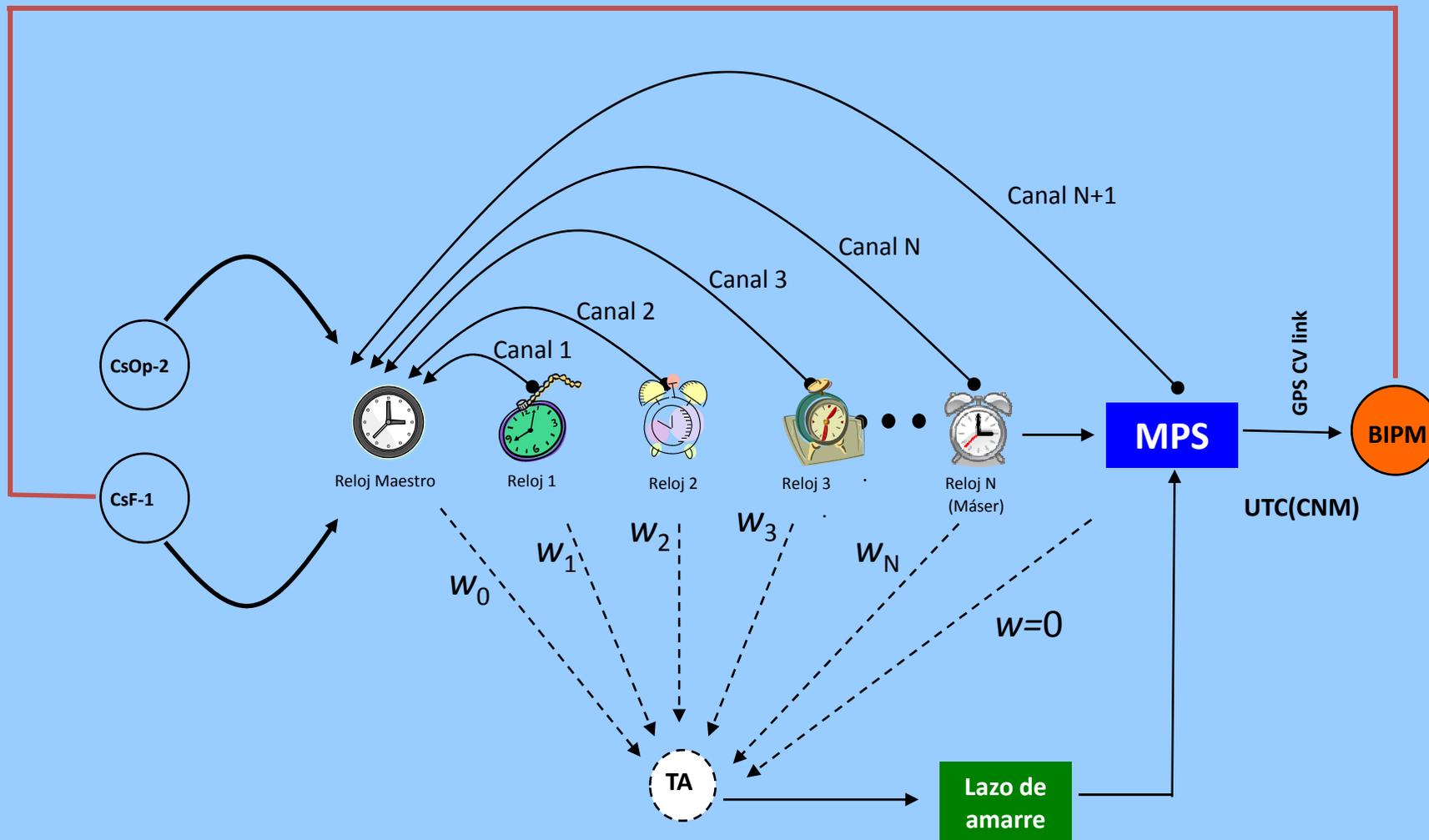
La escala TA así definida es similar a la escala EAL del BIPM, la característica metrológica principal es la estabilidad. La escala TA es una escala virtual

Experimento



Arreglo experimental para transformar el reloj virtual en un reloj real

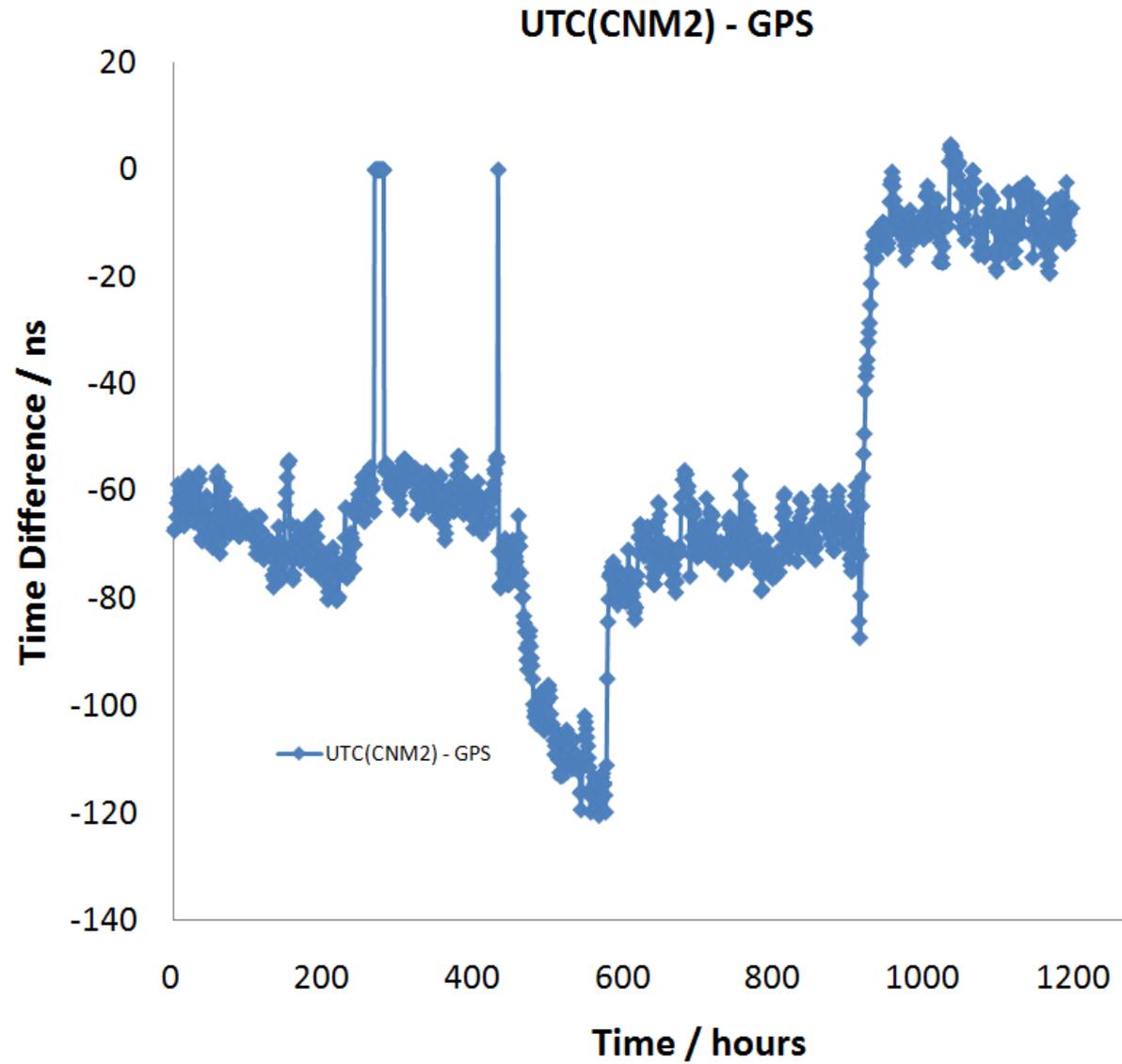
Esquema completo de generación del UTC(CNM)



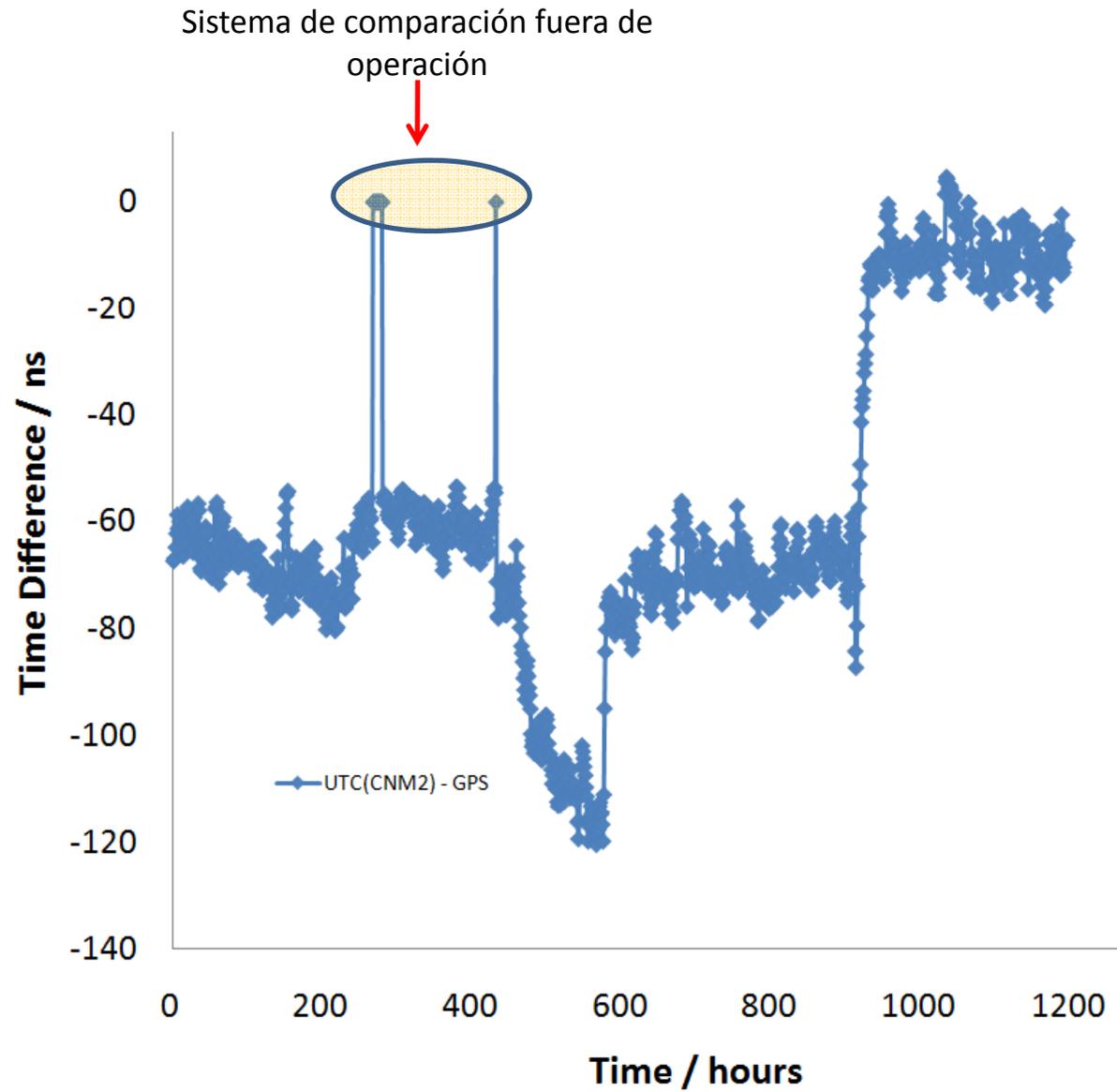
Contenido

1. La importancia de las escalas de tiempo
2. El UTC(CNM)
3. Nuevo esquema de generación del UTC(CNM)
- 4. Resultados de la comparación de la nueva escala de tiempo con otras escalas**

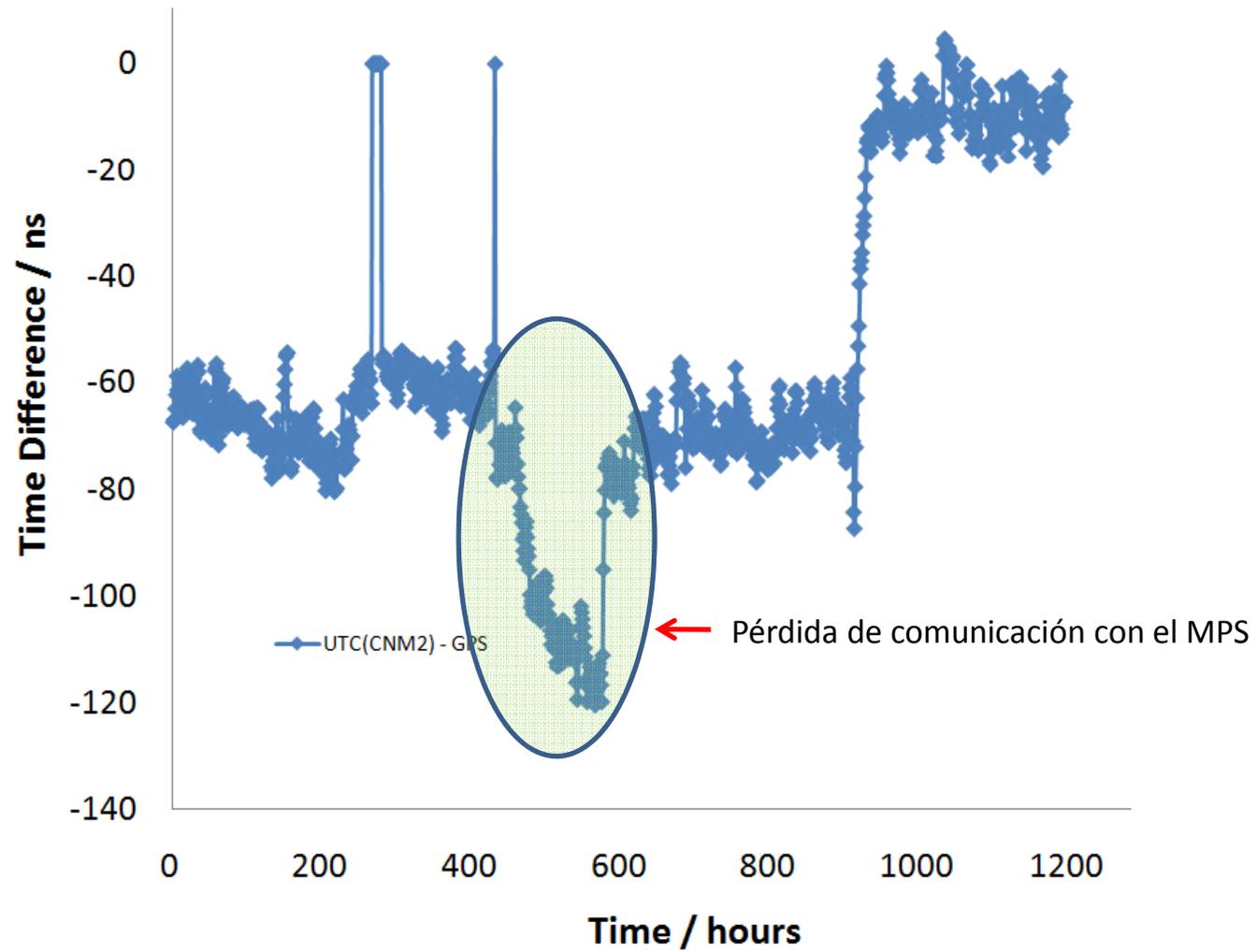
50 días de comparación con el sistema GPS



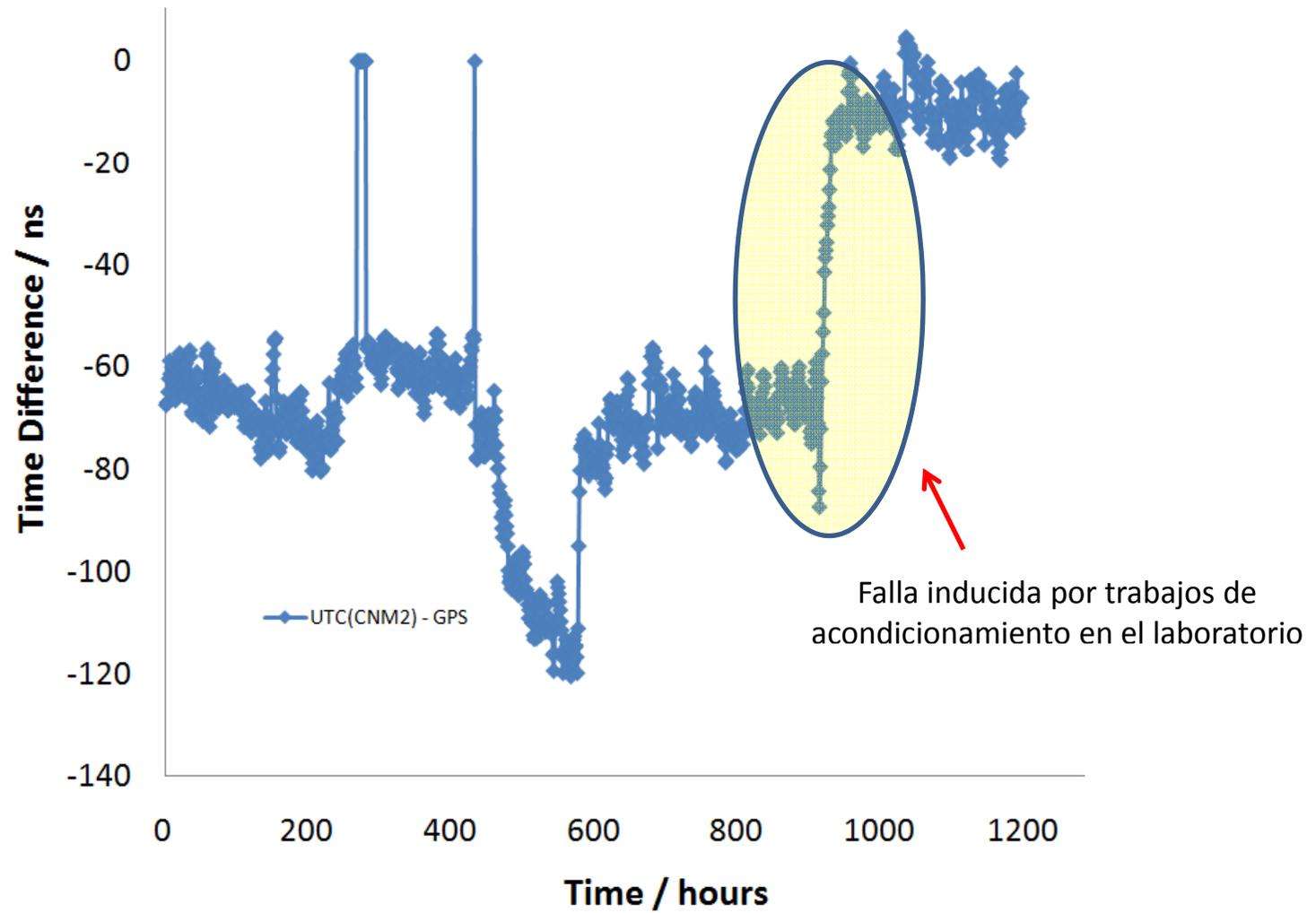
50 días de comparación con el sistema GPS



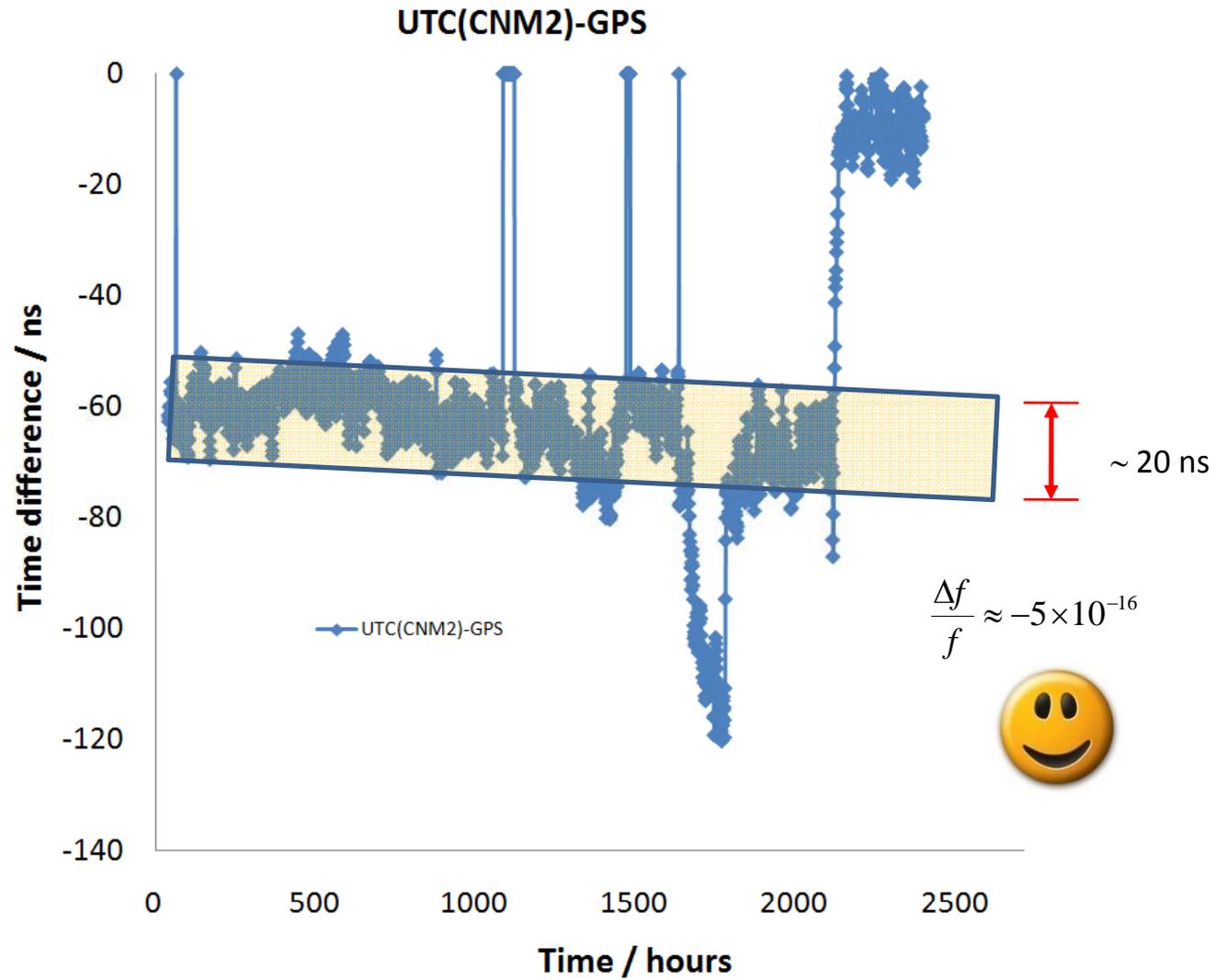
50 días de comparación con el sistema GPS



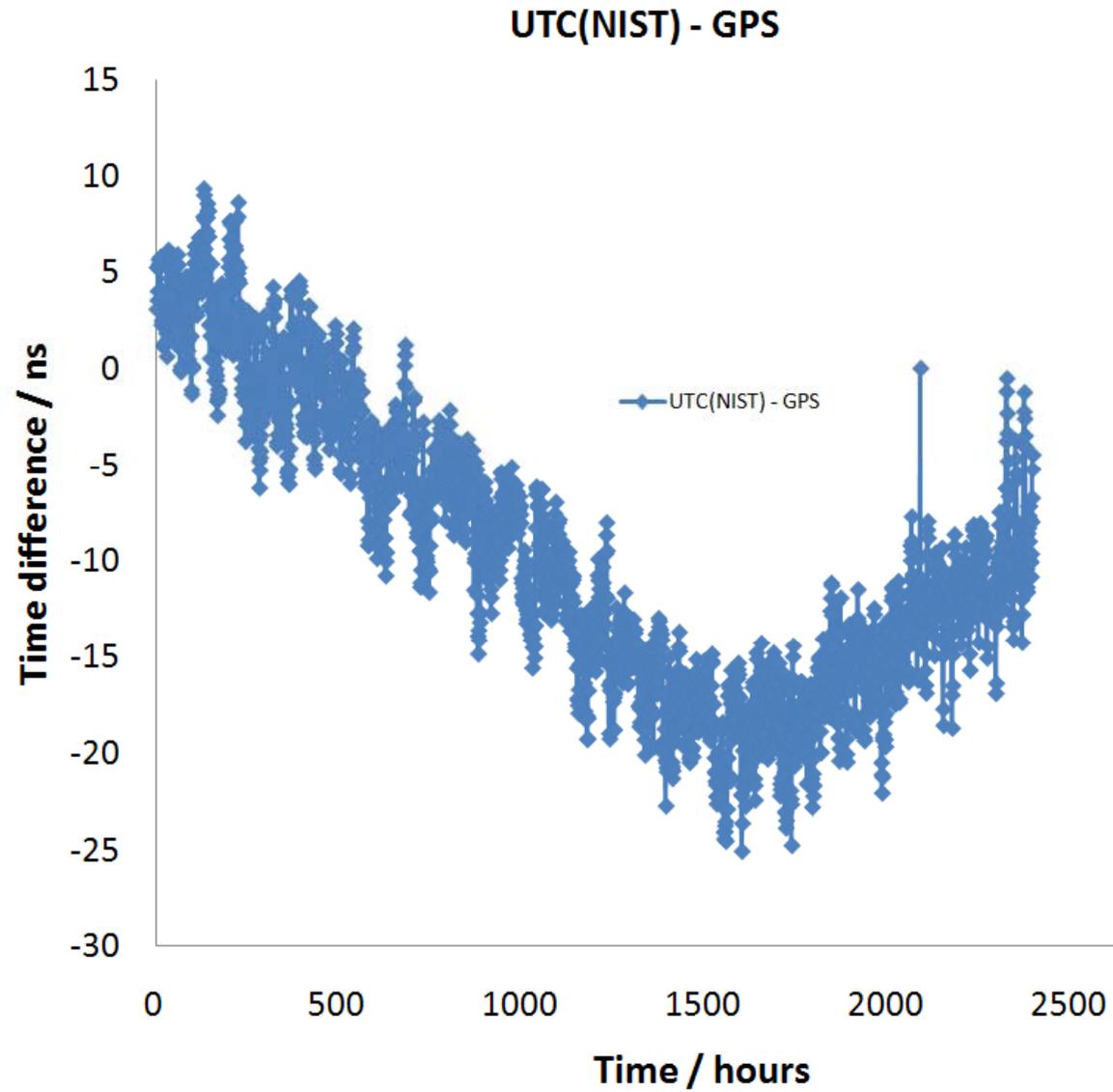
50 días de comparación con el sistema GPS



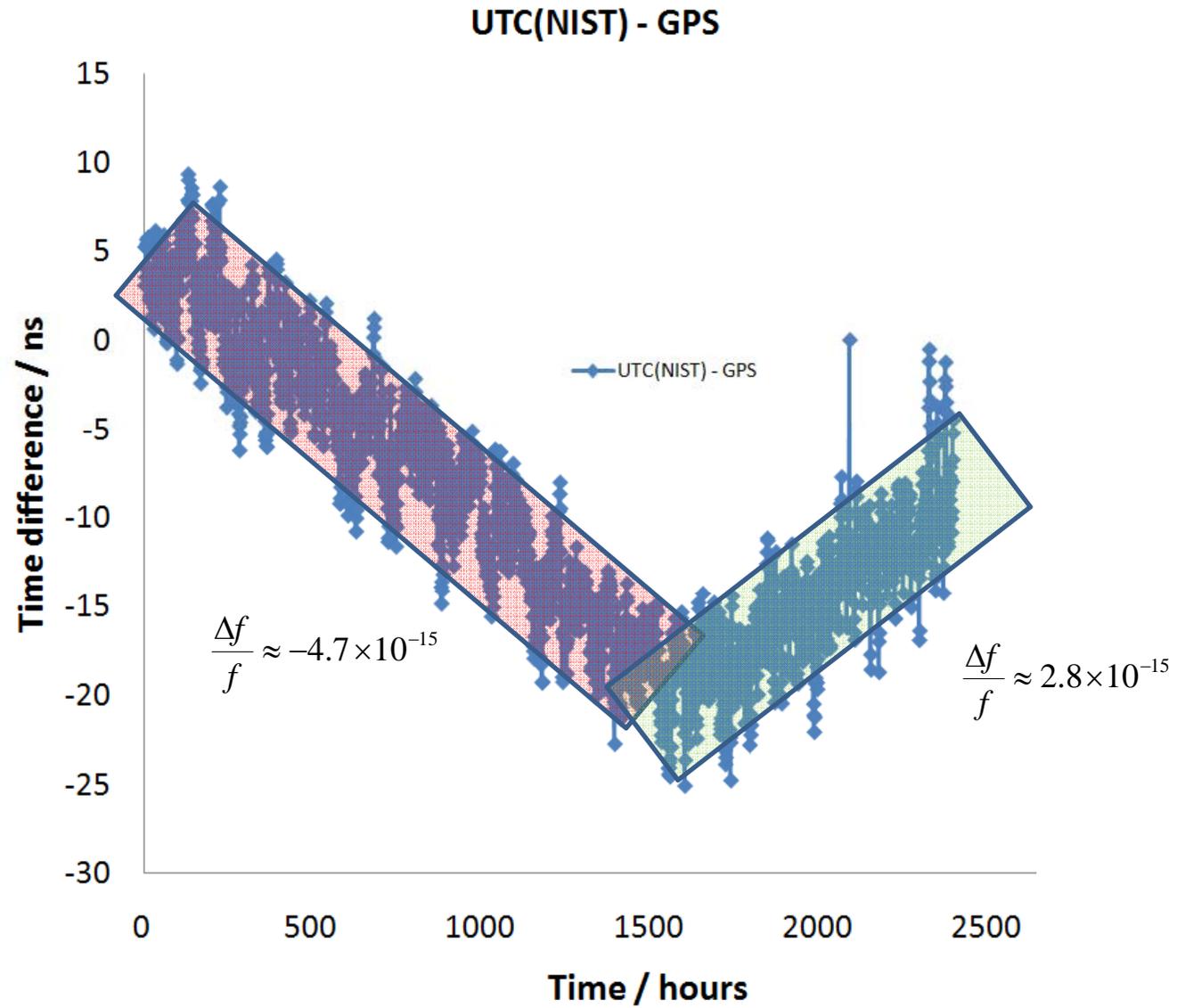
100 días de comparación con el sistema GPS



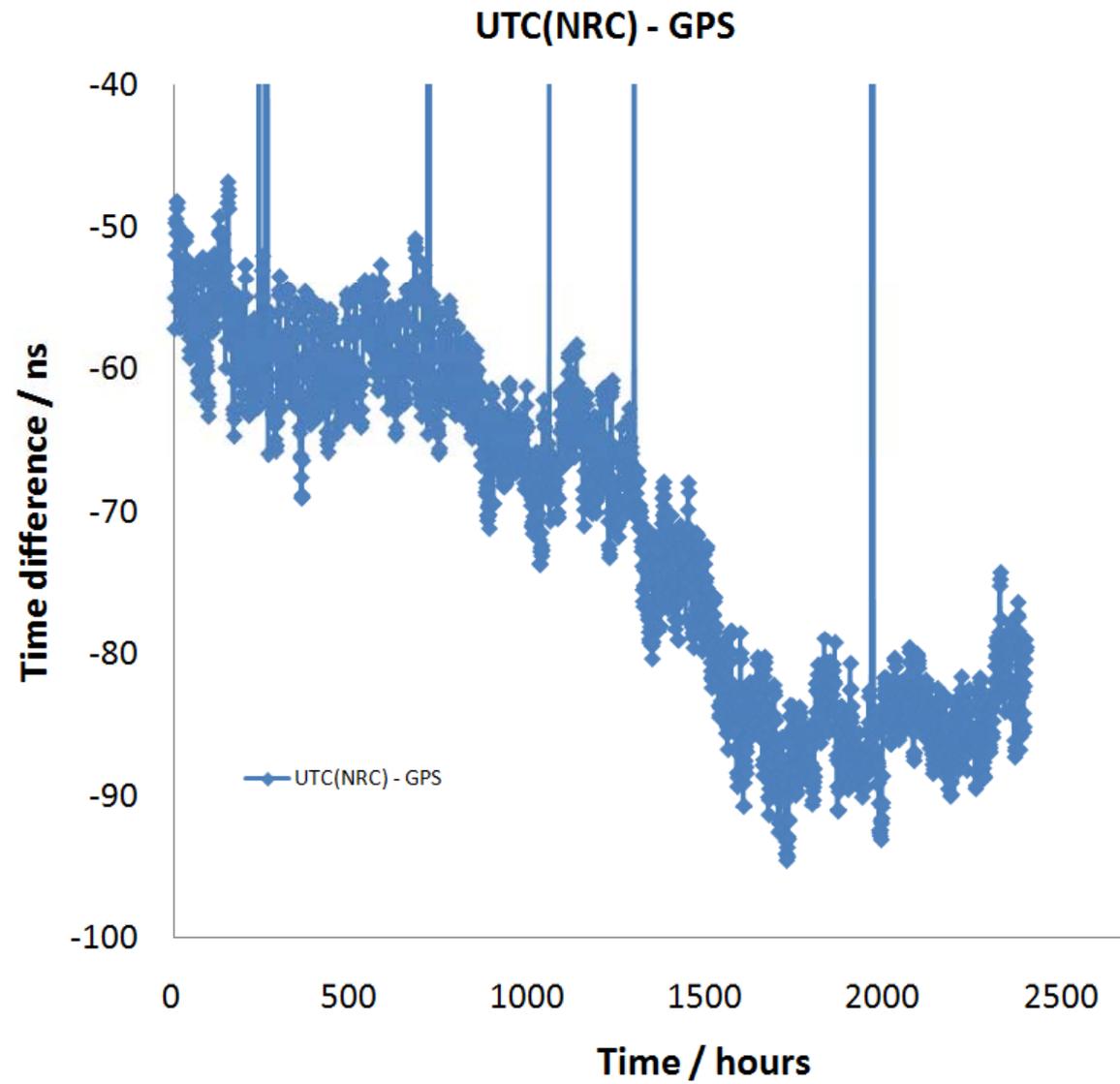
100 días de comparación con el sistema GPS



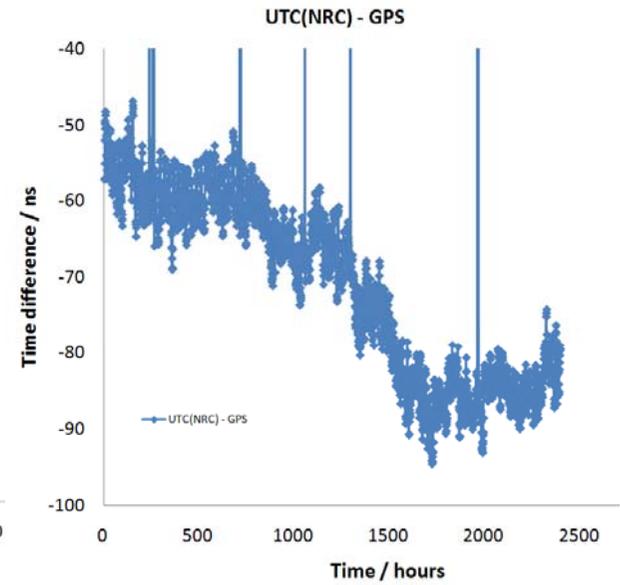
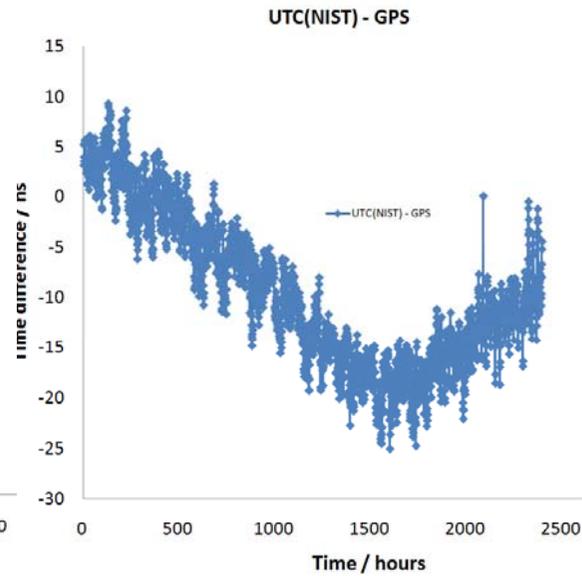
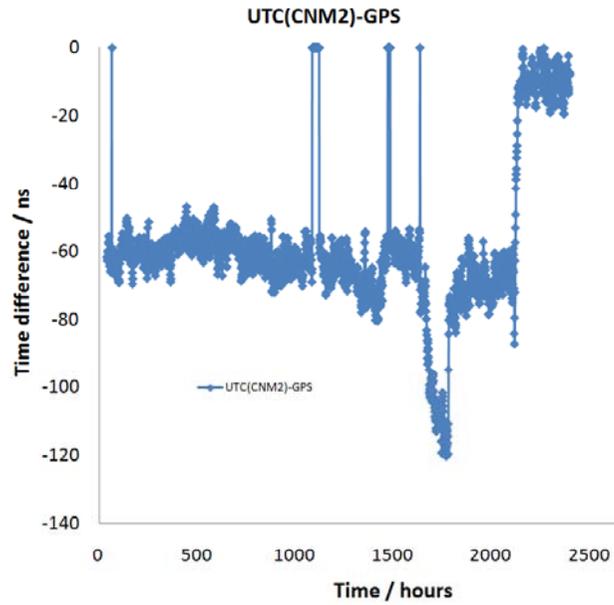
100 días de comparación con el sistema GPS



100 días de comparación con el sistema GPS

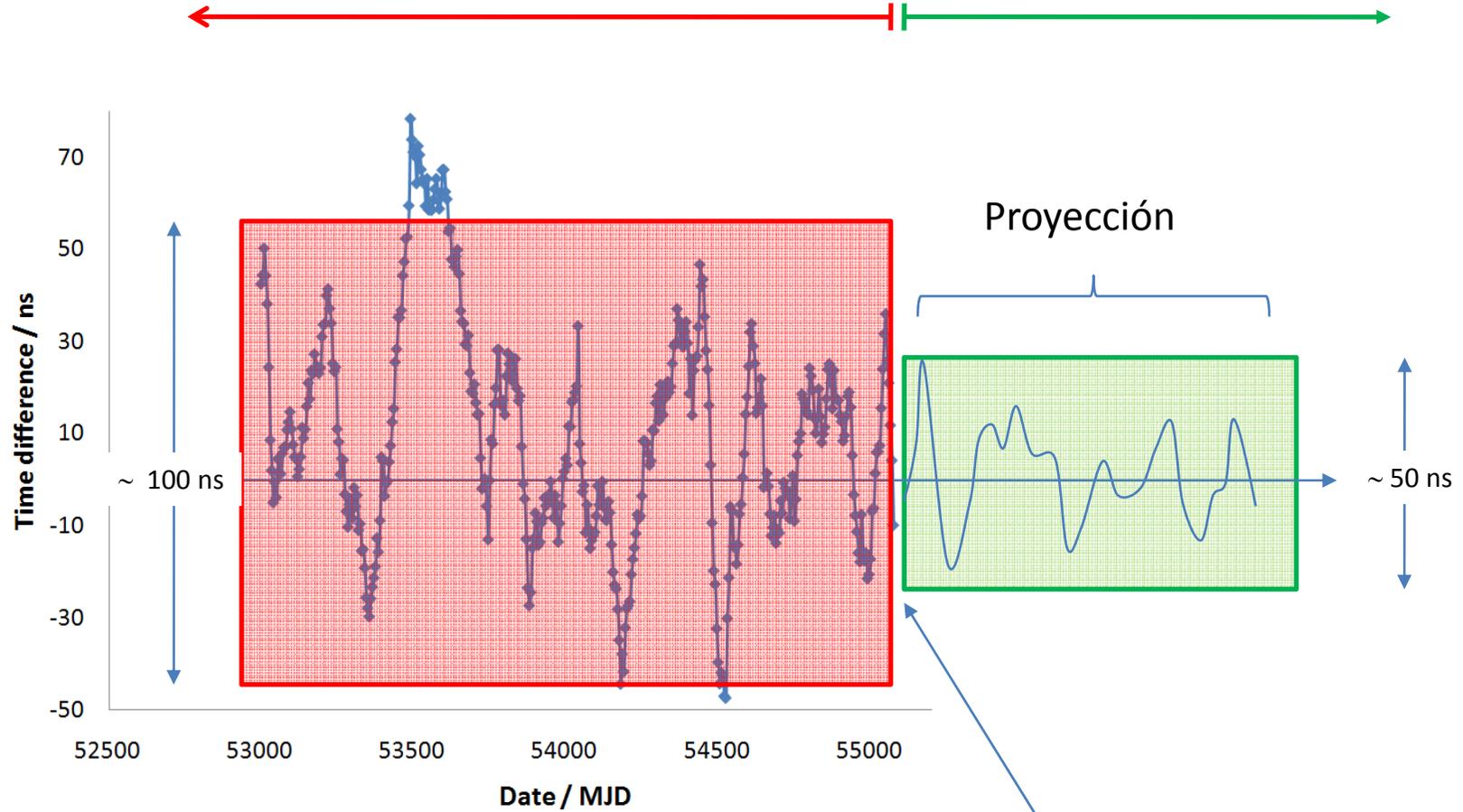


Resumen



Antiguo esquema de generación de la escala de tiempo UTC(CNM)

Nuevo esquema mejorado de generación de la escala de tiempo UTC(CNM)



1 octubre 2009

Con el nuevo esquema de generación esperamos que el desempeño de la escala UTC(CNM) se ubique como una de las 5 mejores escalas de tiempo del mundo.

