

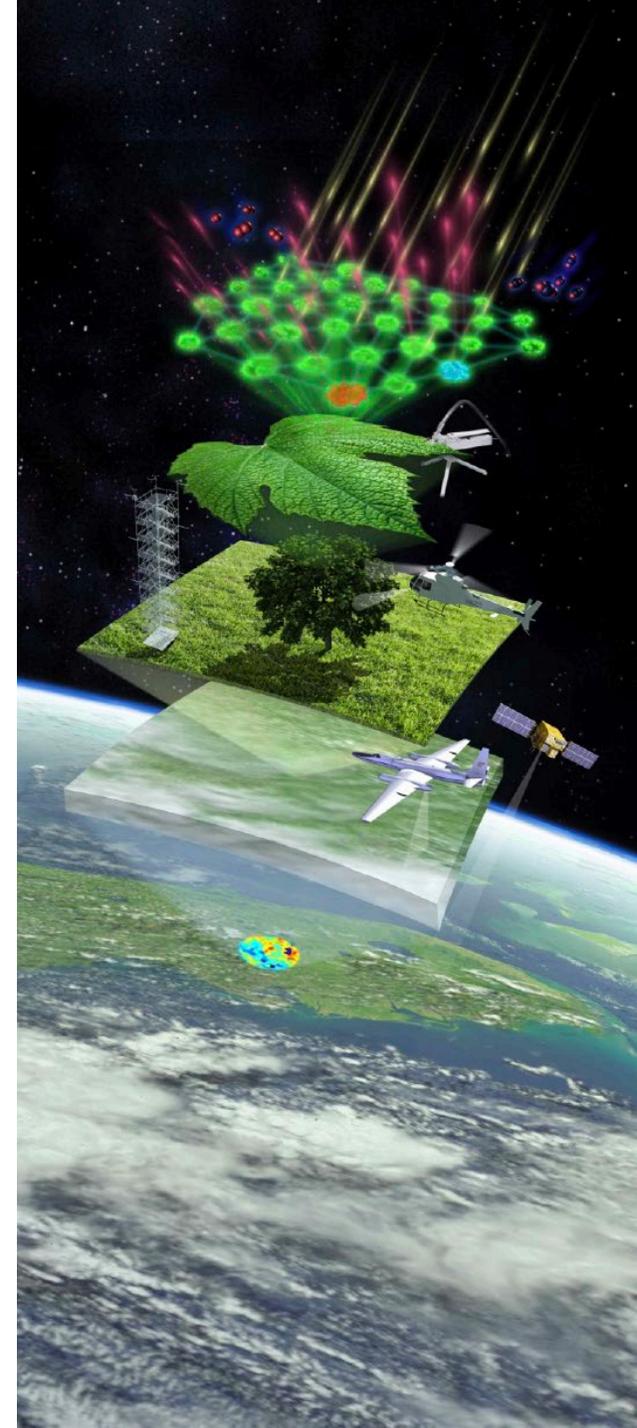
# El Uso de la Fluorescencia Inducida por el Sol para Evaluar la Vegetación

Christian Frankenberg, Philipp Köhler



# Agenda

- Repaso de diferentes conjuntos de datos satelitales de la Fluorescencia Inducida por el Sol (SIF por sus siglas en inglés)
- Sus características
- Dónde acceder los datos
- Demostración con datos de OCO-2 mostrando cómo abrir, interpretar y analizar los datos para identificar el estrés en la vegetación
- Sesión de preguntas y respuestas



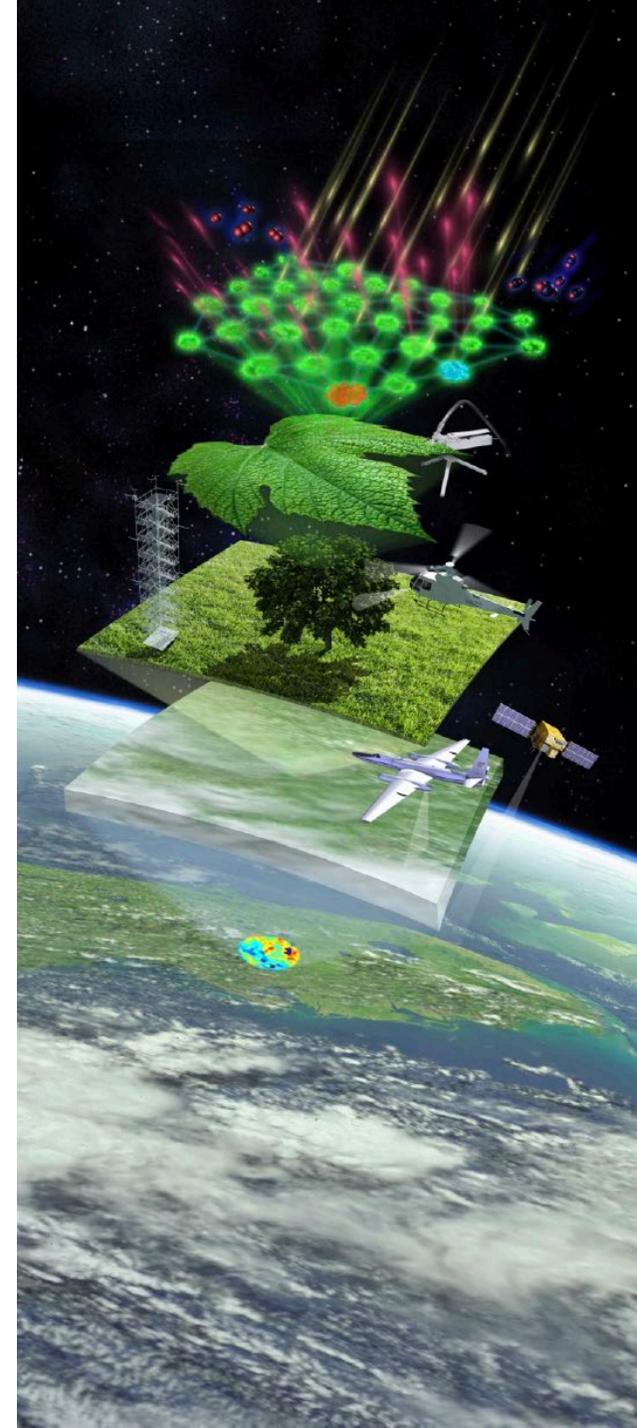
# Parte 1

- Introducción a SIF
- La fluorimetría activa y la fluorescencia inducida por el sol
- ¿Cómo medimos la fluorescencia?
- Limitaciones del uso de la SIF



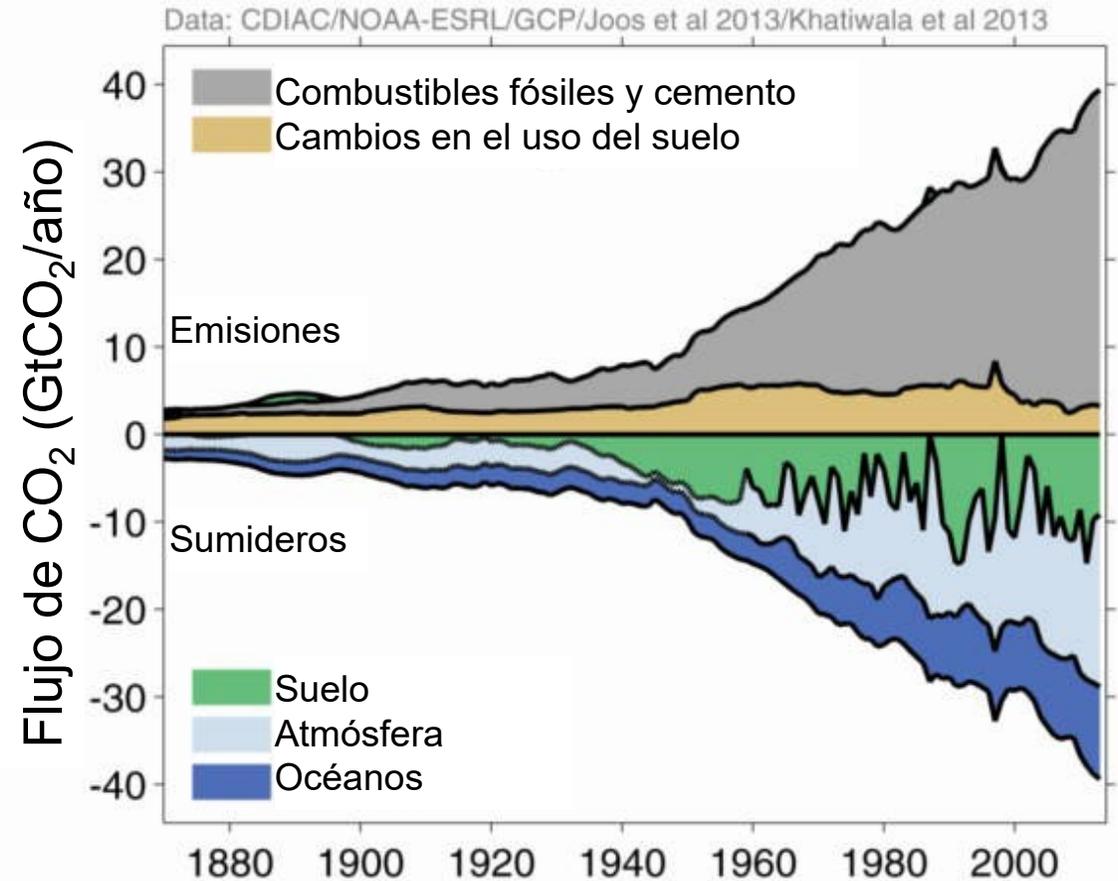
# Objetivos de Aprendizaje

- Entender los conceptos básicos de SIF
- ¿Cómo está relacionado SIF con la fotosíntesis y el transporte de electrones?
- ¿Cuál es la diferencia entre la fluorescencia por pulso de amplitud modulada (PAM) y la SIF?
- Saber cómo interpretar las mediciones y aplicarlas.
- Poder acceder, abrir y analizar datos de SIF.



# Motivación

- El Ciclo Mundial del Carbono
- La fotosíntesis (absorción bruta de  $\text{CO}_2$ ) es el mayor sumidero de carbono en la atmósfera de la Tierra. Su futuro determinará si las plantas seguirán haciéndonos el favor de absorber el  $\text{CO}_2$ .



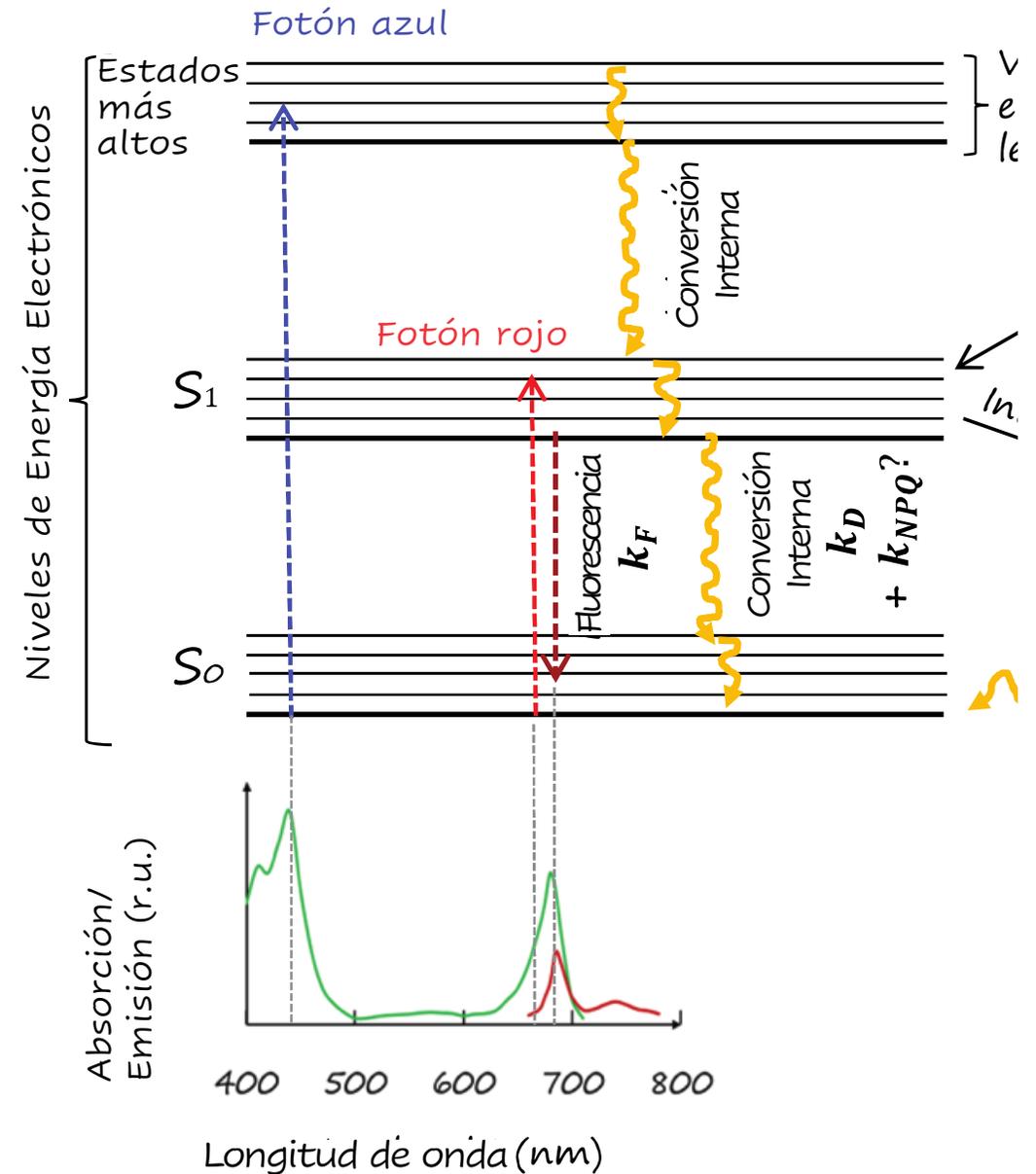
# Introducción a la Fluorescencia de la Clorofila Inducida por el Sol

- Una pequeña fracción de la luz absorbida se reemite como fluorescencia ( $>700\text{nm}$ , superpuesta mínimamente con la gama espectral visible).
- Esto sucede aun con la clorofila disuelta (p. ej., en alcohol). Ver la imagen a la derecha.



# Introducción a la Fluorescencia de la Clorofila Inducida por el Sol

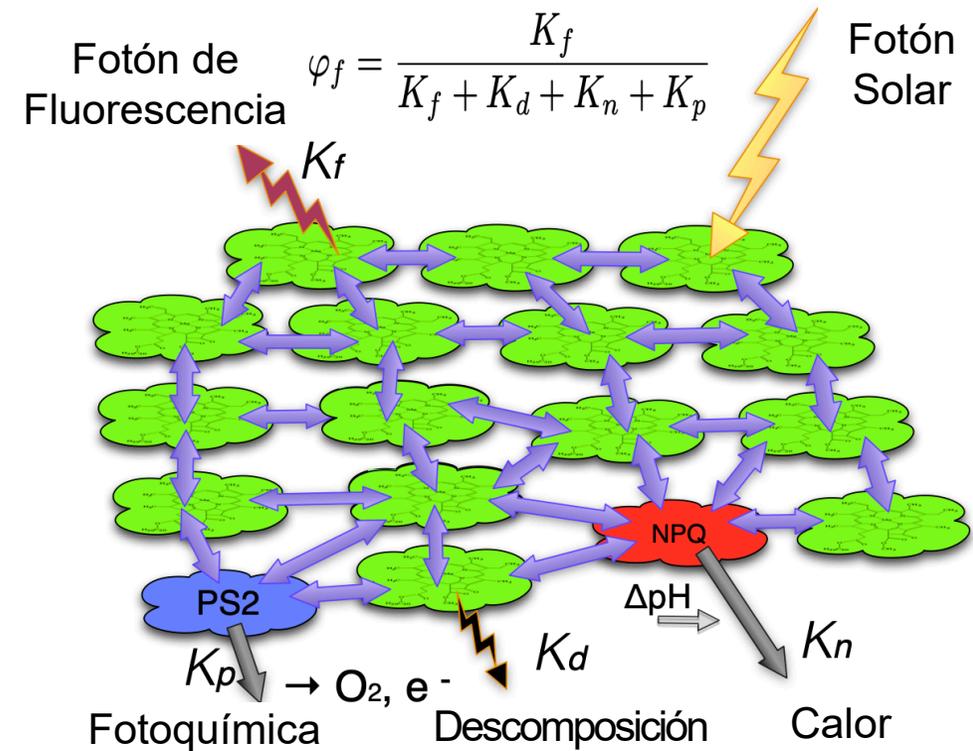
- Durante la fotosíntesis, una pequeña fracción de la energía se reemite como luz (fluorescencia).
- Los instrumentos de teledetección incluyen una región de medición que revela esta señal.
- Esta medición está más directamente vinculada con la salud y actividad de las plantas que las mediciones tradicionales como el verdor.



**Fig. 3.** Idealized Jablonski diagram illustrating the energy partitioning of absorbed blue light, an electron from the ground state is raised to a higher energy state. The  
Porcar-Castell et al 2014, review initiated at KISS

# Introducción a la Fluorescencia de la Clorofila Inducida por el Sol

- Durante la fotosíntesis, una pequeña fracción de la energía se reemite como luz (fluorescencia).
- Los instrumentos de teledetección incluyen una región de medición que revela esta señal.
- Esta medición está más directamente vinculada con la salud y actividad de las plantas que las mediciones tradicionales como el verdor.

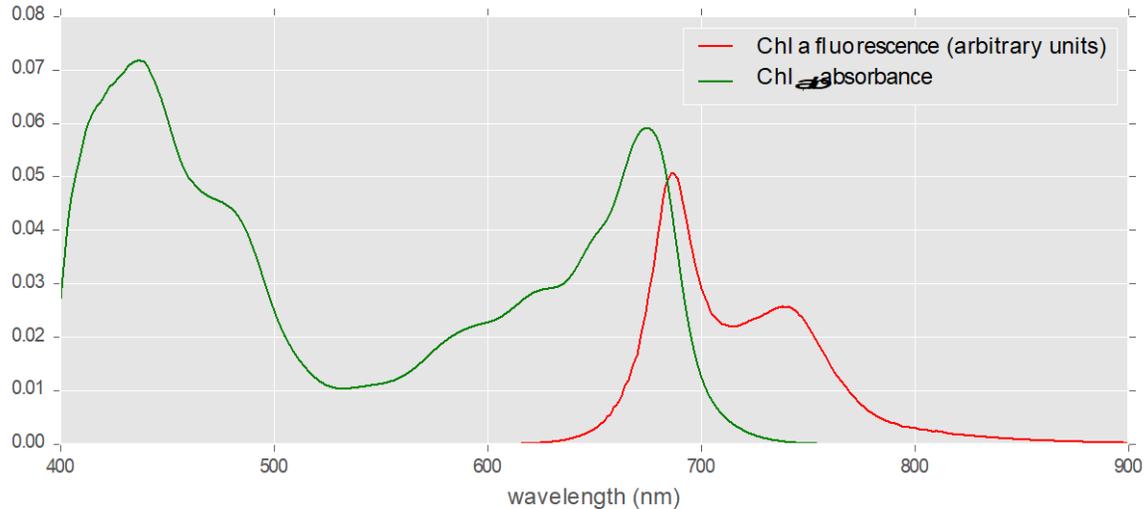


from Frankenberg, Berry, Guanter, Joiner (2012)

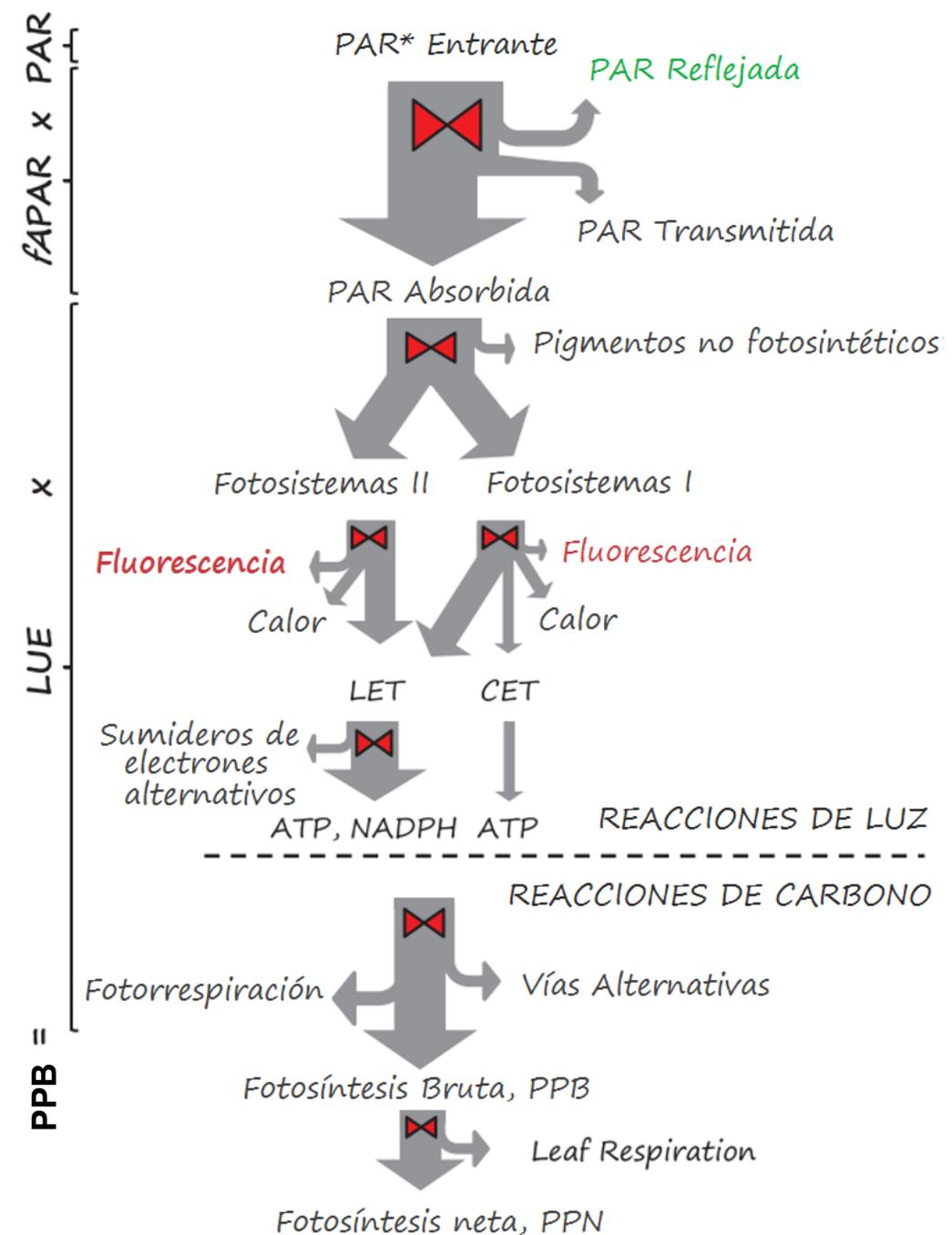
DARWIN REVIEW

# Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges

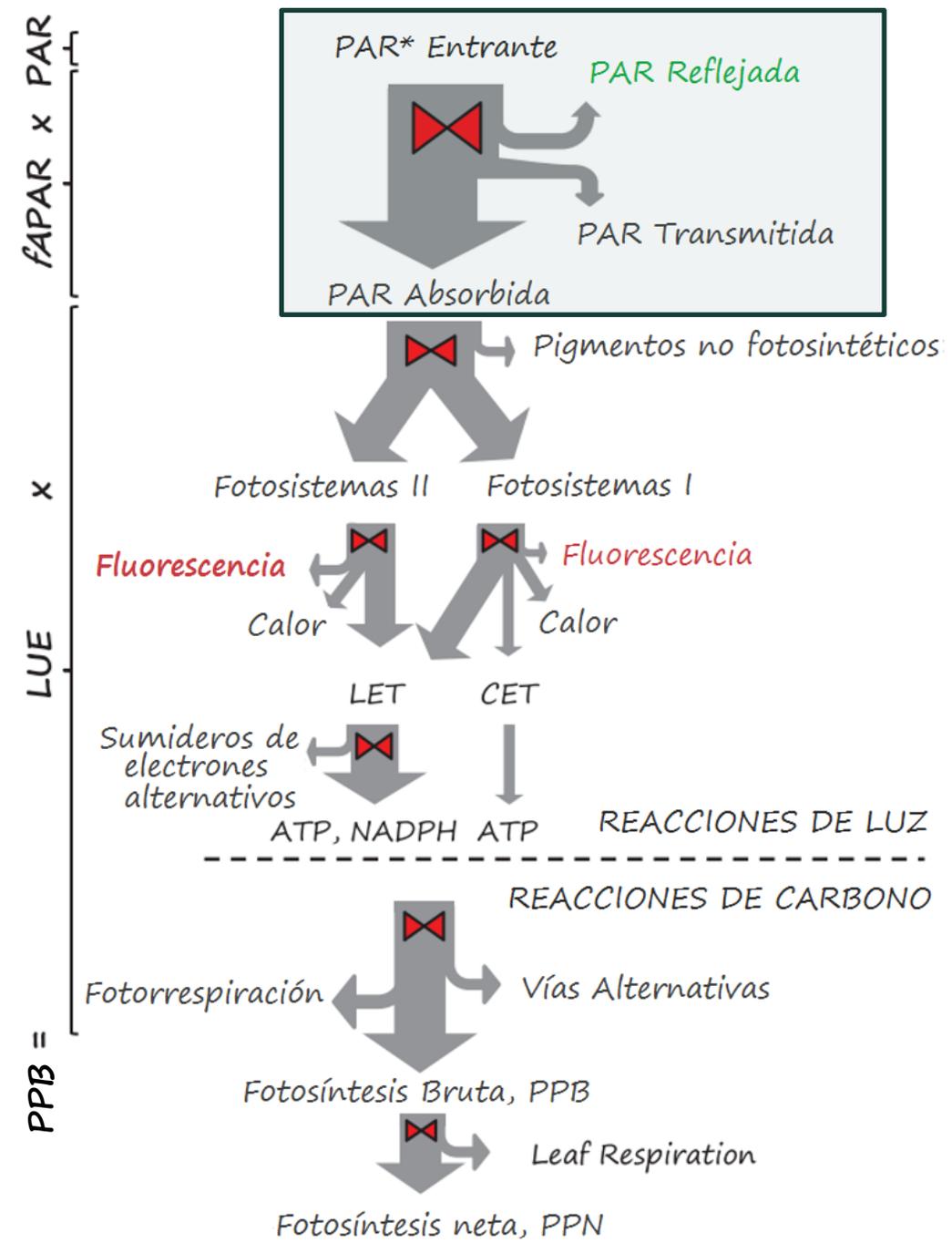
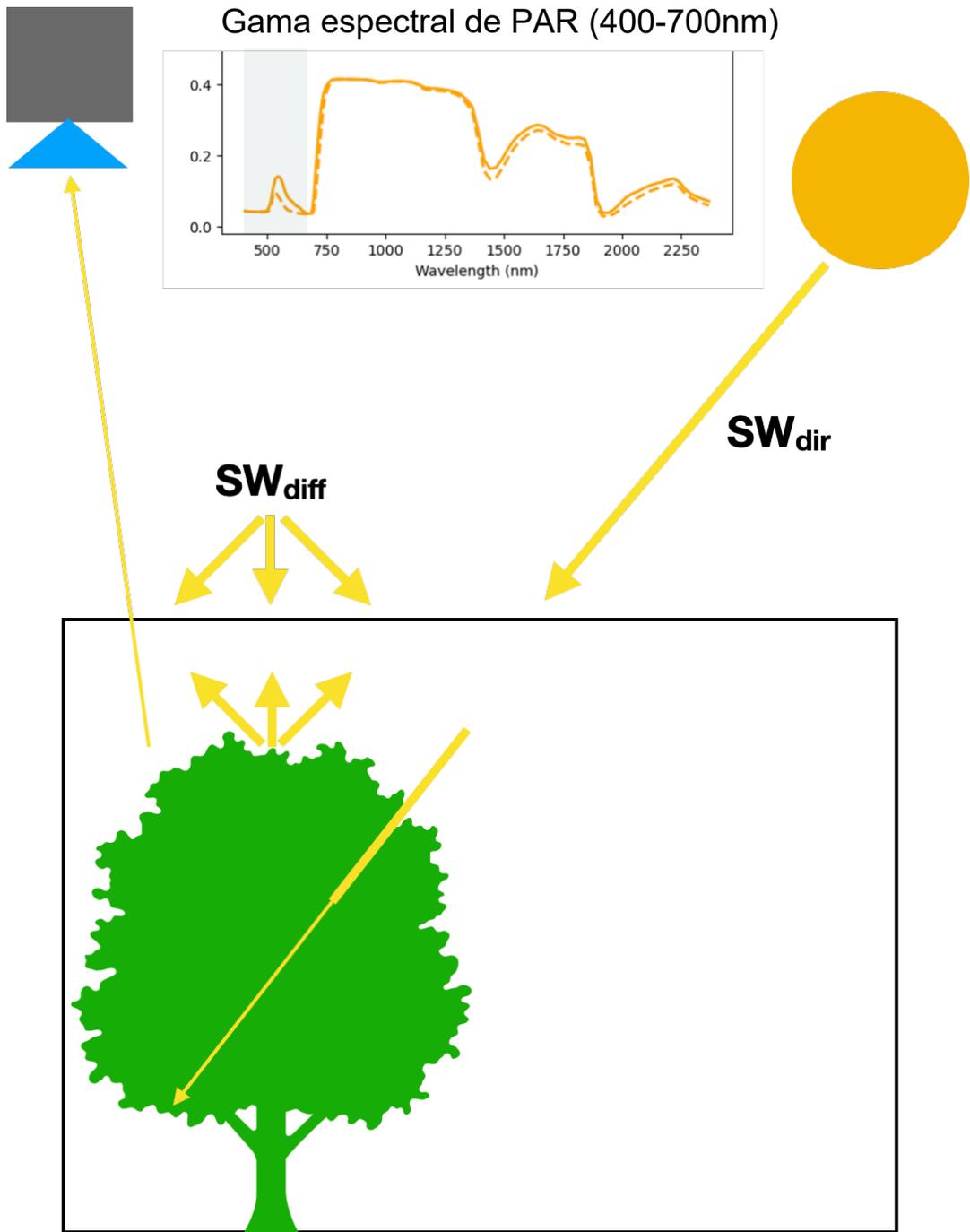
Albert Porcar-Castell<sup>1,\*</sup>, Esa Tyystjärvi<sup>2</sup>, Jon Atherton<sup>1</sup>, Christiaan van der Tol<sup>3</sup>, Jaime Flexas<sup>4</sup>, Erhard E. Pfündel<sup>5</sup>, Jose Moreno<sup>6</sup>, Christian Frankenberg<sup>7</sup> and Joseph A. Berry<sup>8</sup>



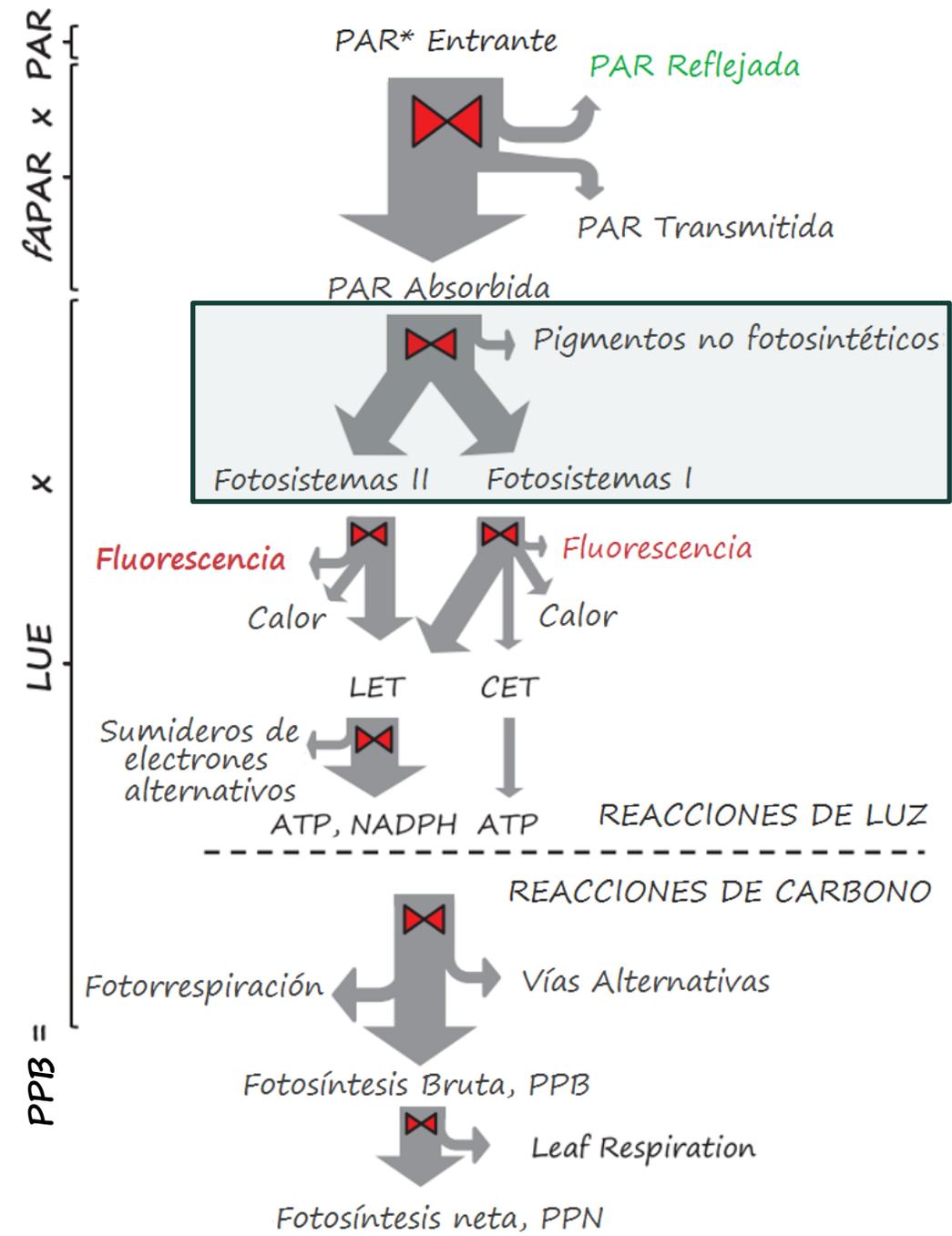
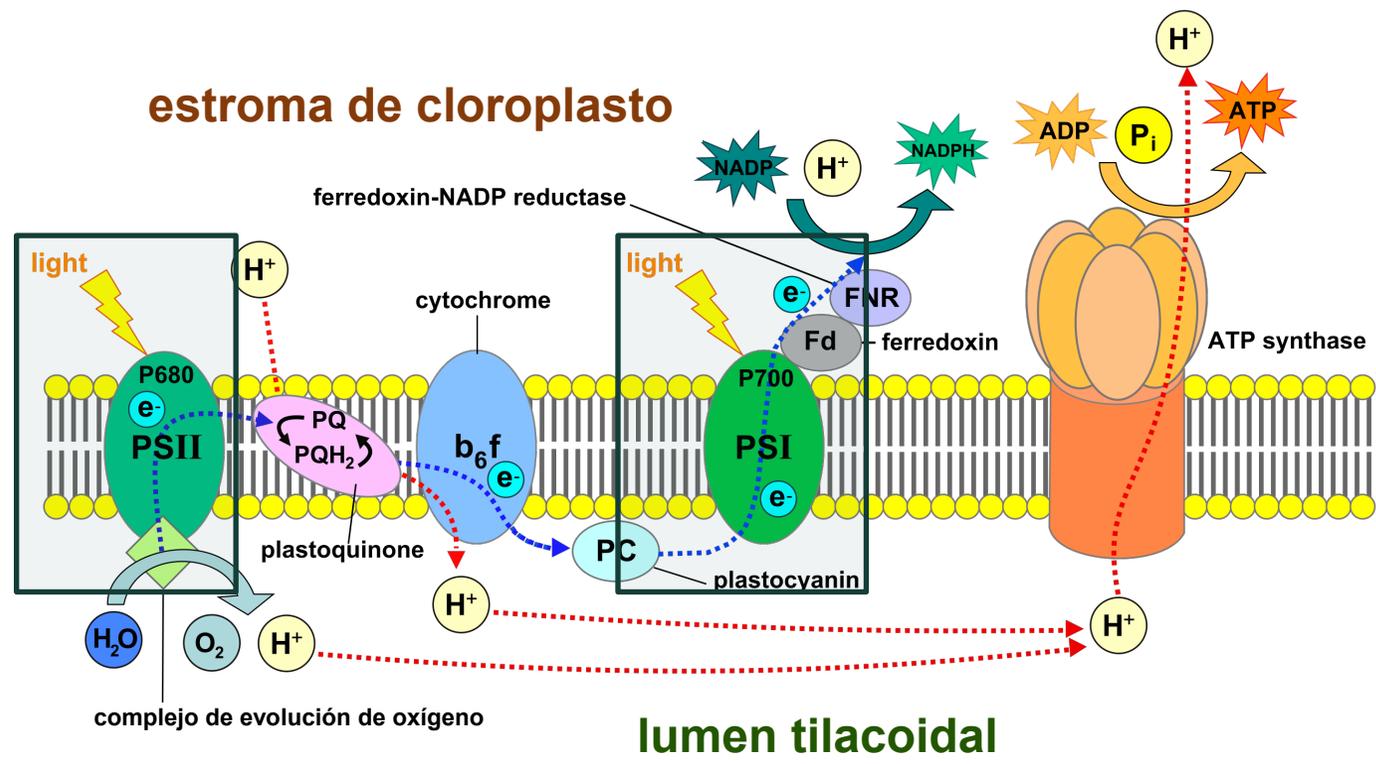
Publicación: Vinculando la fluorescencia de la clorofila A con la fotosíntesis para aplicaciones de teledetección: mecanismos y desafíos



\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)

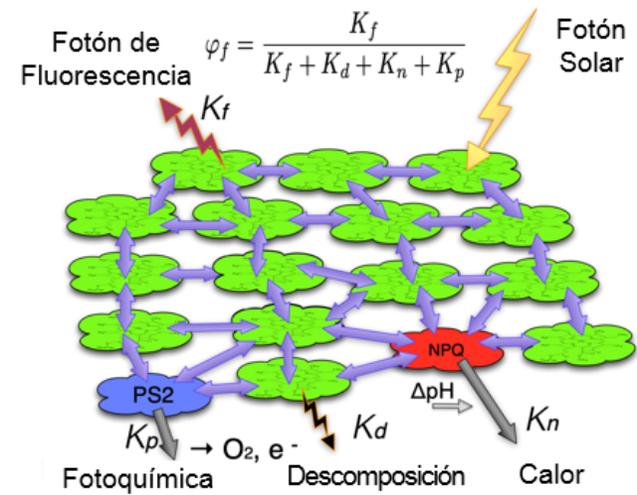


\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem#/media/File:Thylakoid\\_membrane\\_3.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem#/media/File:Thylakoid_membrane_3.svg)

\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)

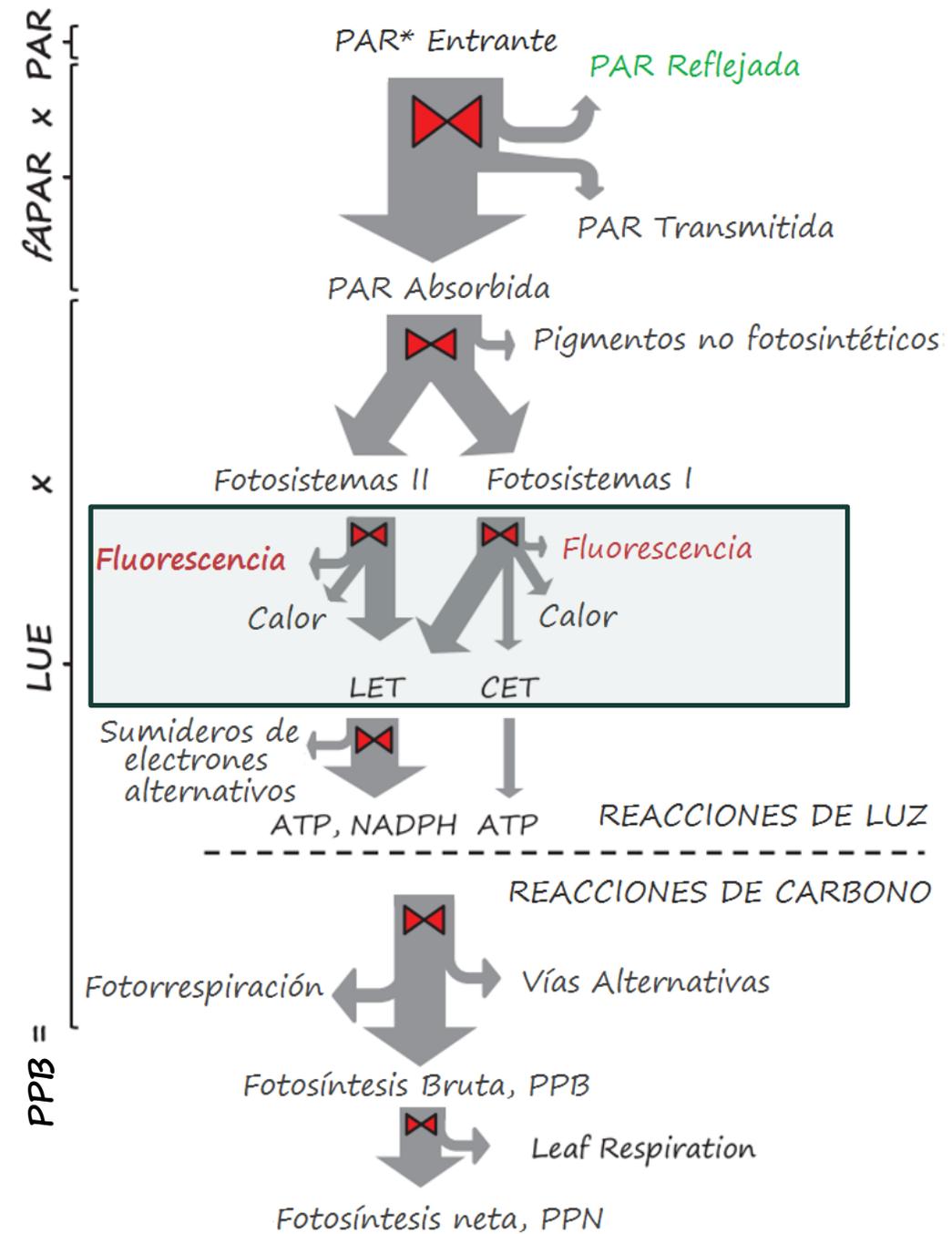


from Frankenberg, Berry, Guanter, Jiner (2012)

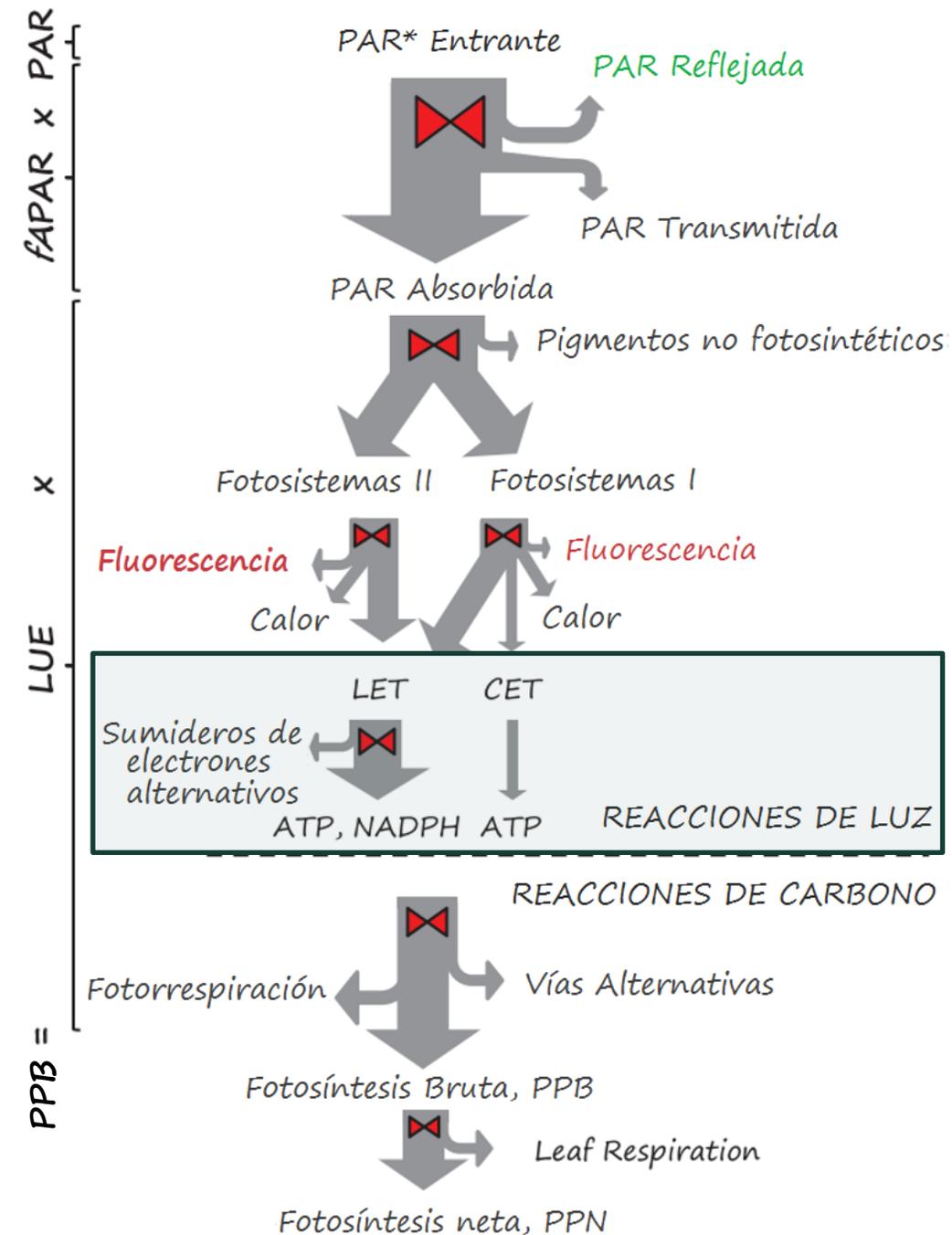
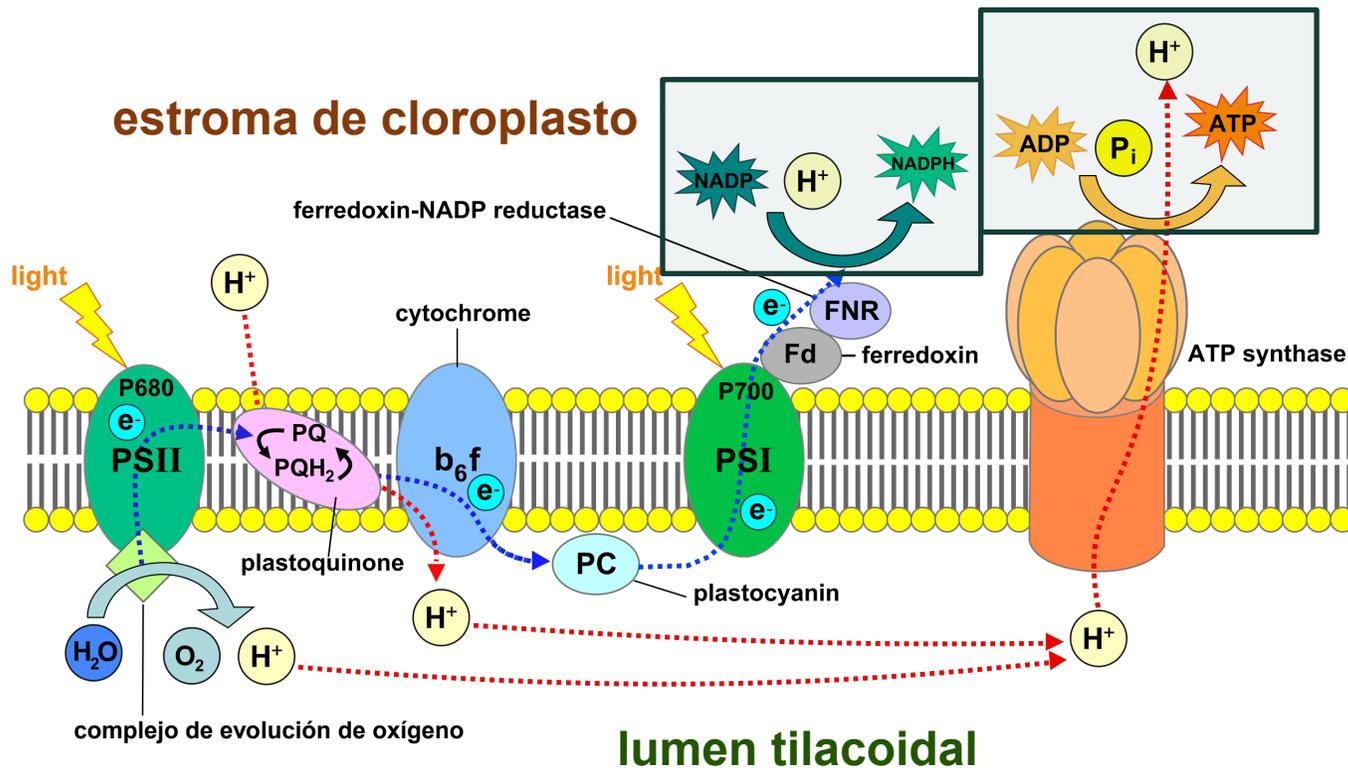
### Rendimiento de Fluorescencia

$$\Phi_f = \frac{K_f}{K_f + K_p + K_n}$$

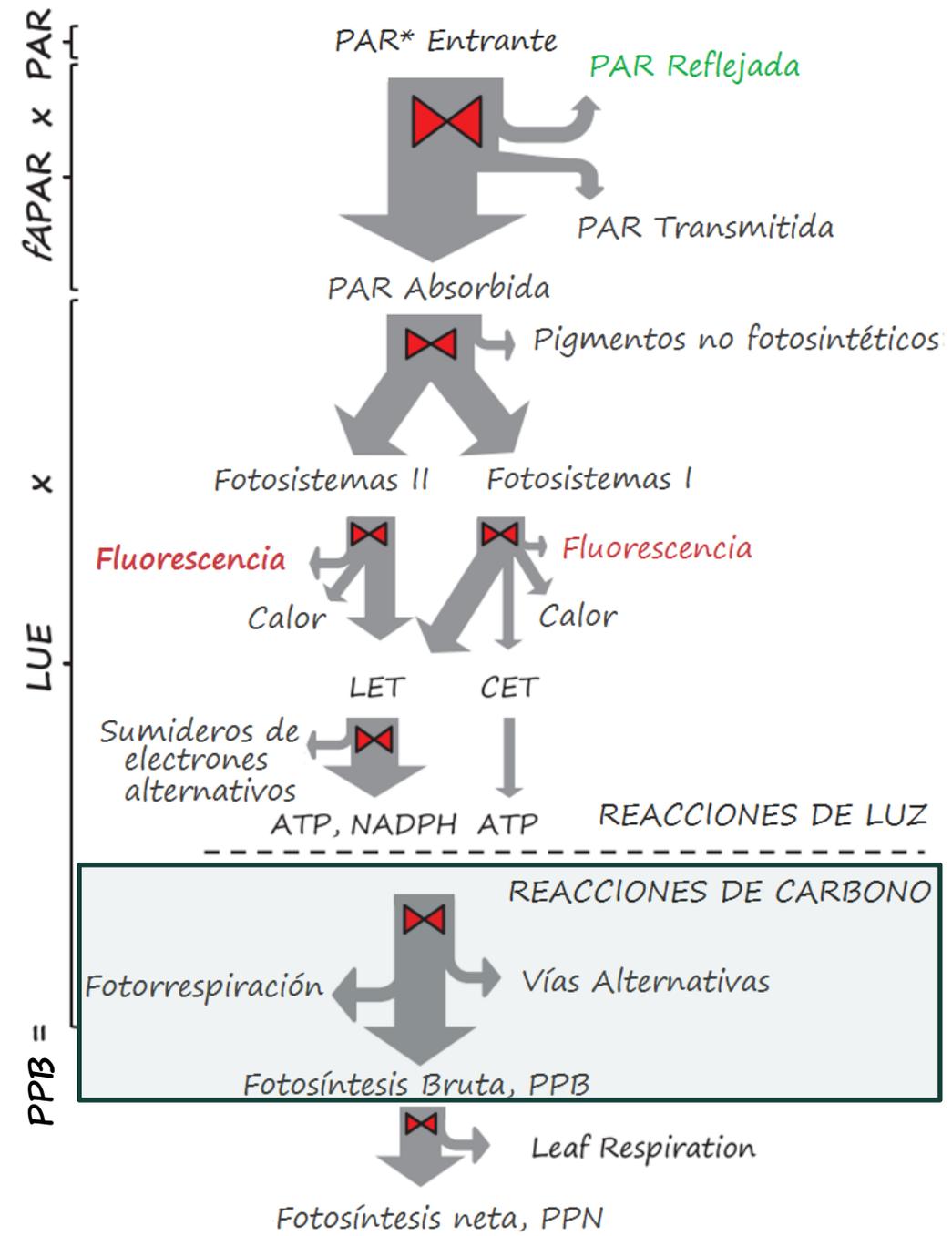
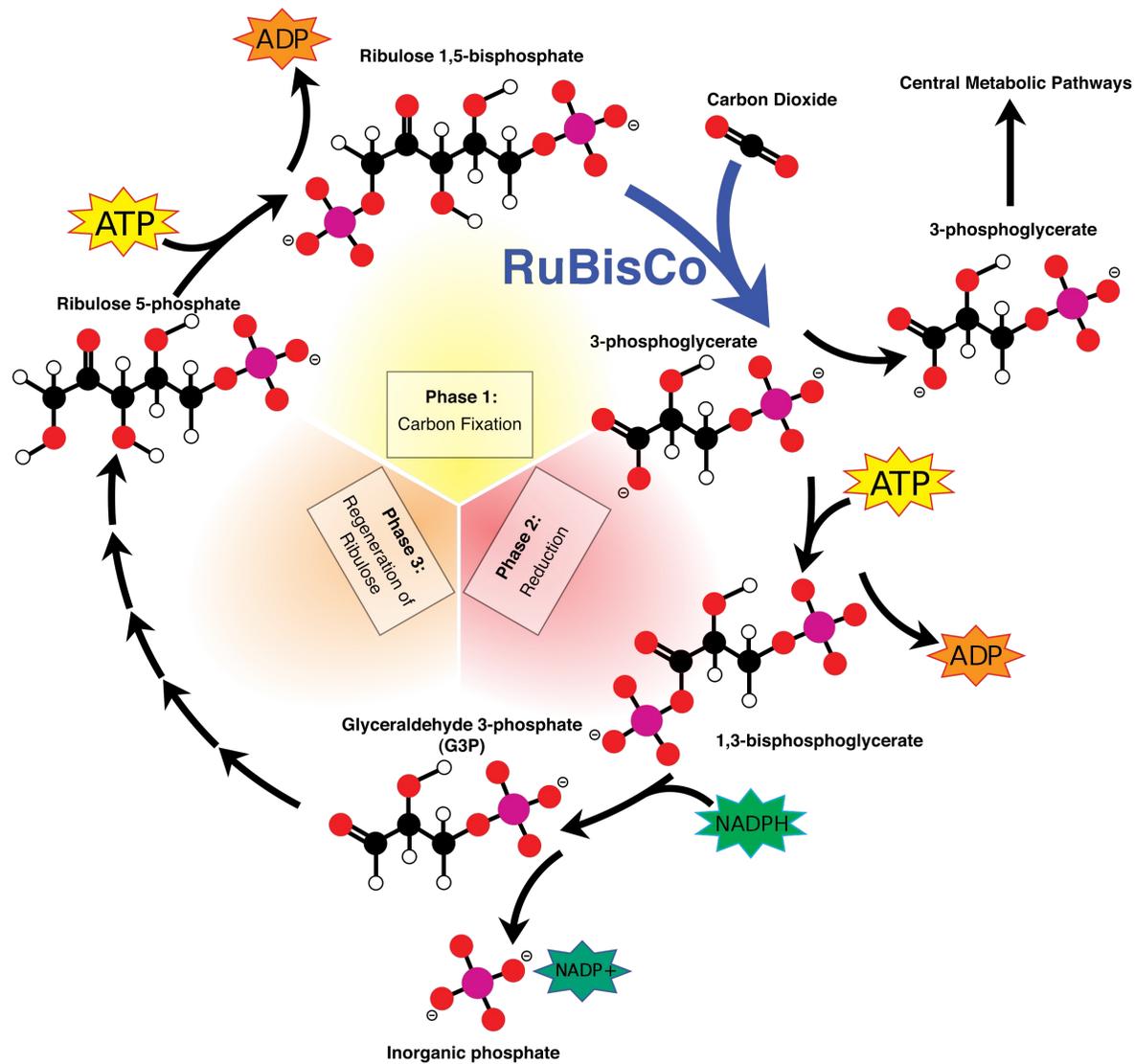
- | Tasas para:
- | Fluorescencia:
- | Fotosíntesis:
- | Disipación del calor: (NPQ)



\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)



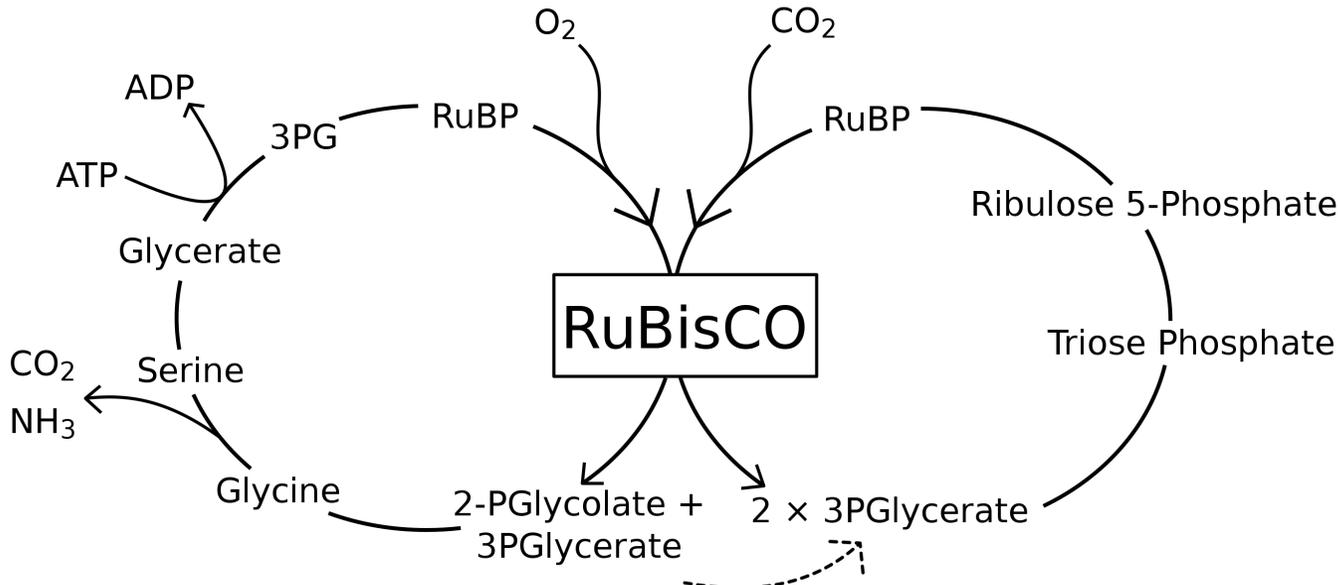
# El Ciclo Calvin-Bassham-Benson



[https://en.wikipedia.org/wiki/Calvin\\_cycle#/media/File:Calvin-cycle4.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Calvin_cycle#/media/File:Calvin-cycle4.svg)

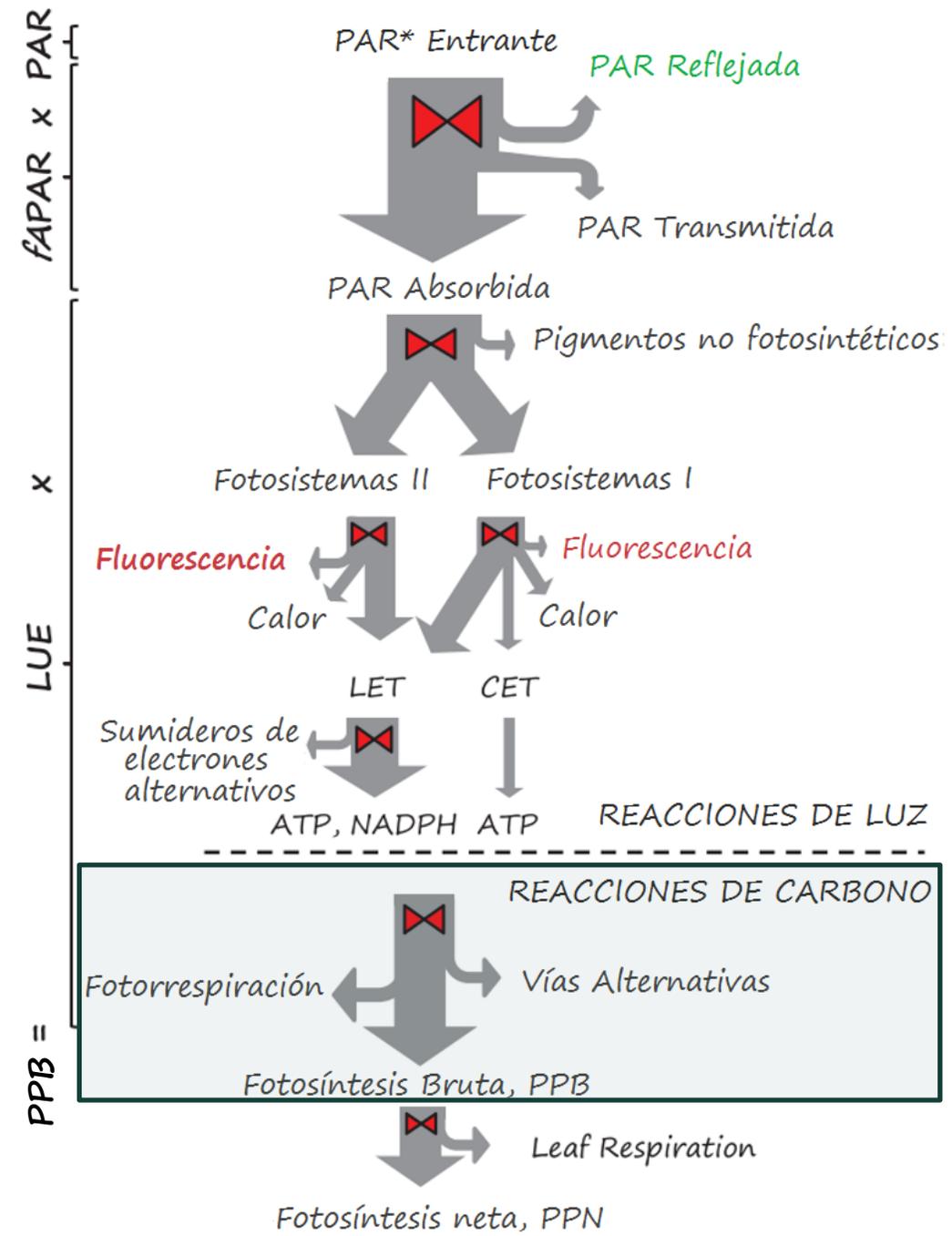
\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)

# Pérdida a través de la Fotorrespiración

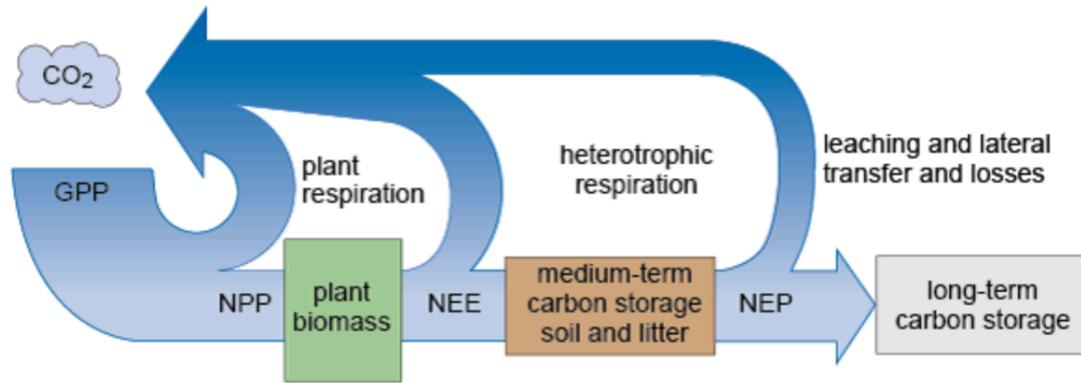


Fotorrespiración

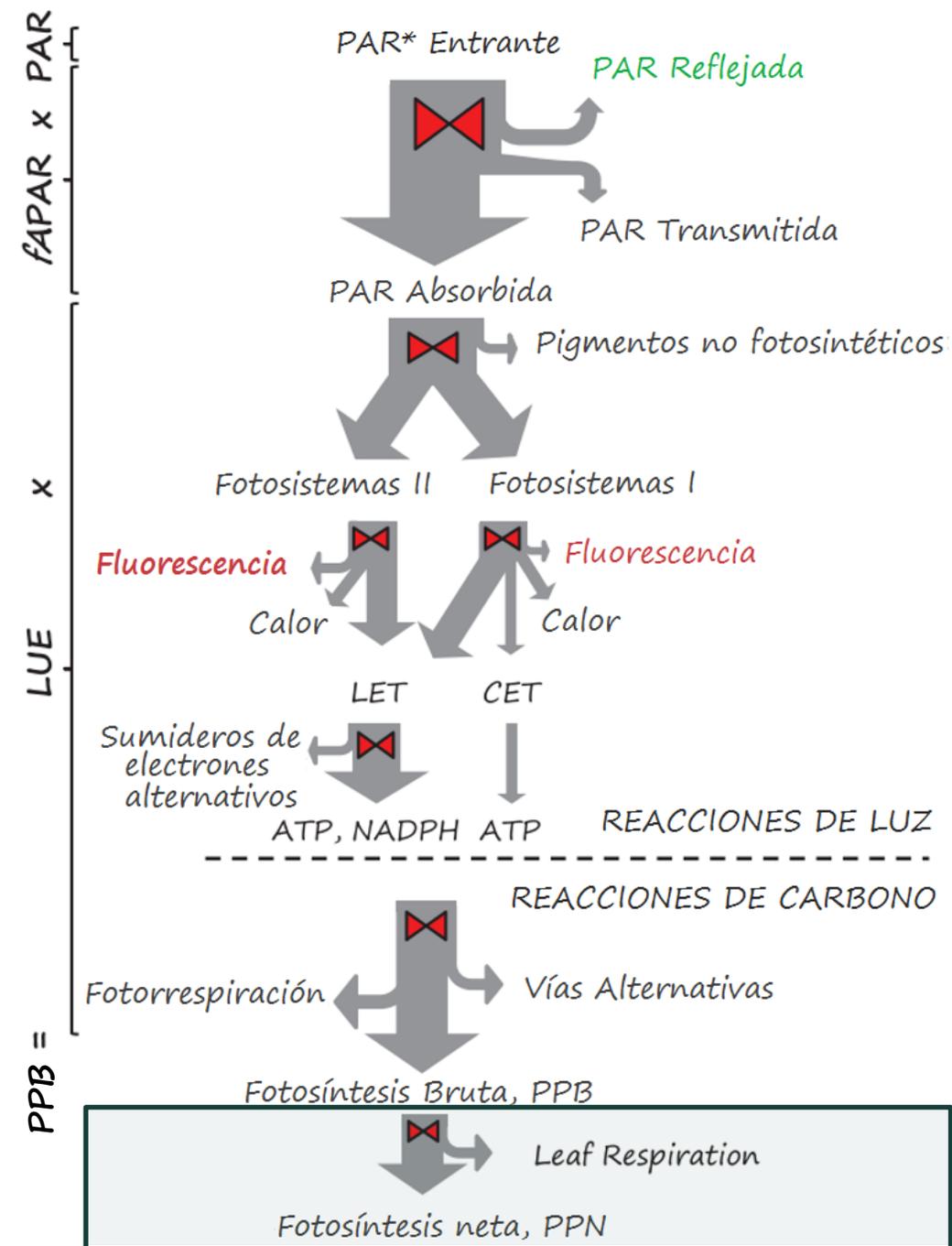
Ciclo Calvin



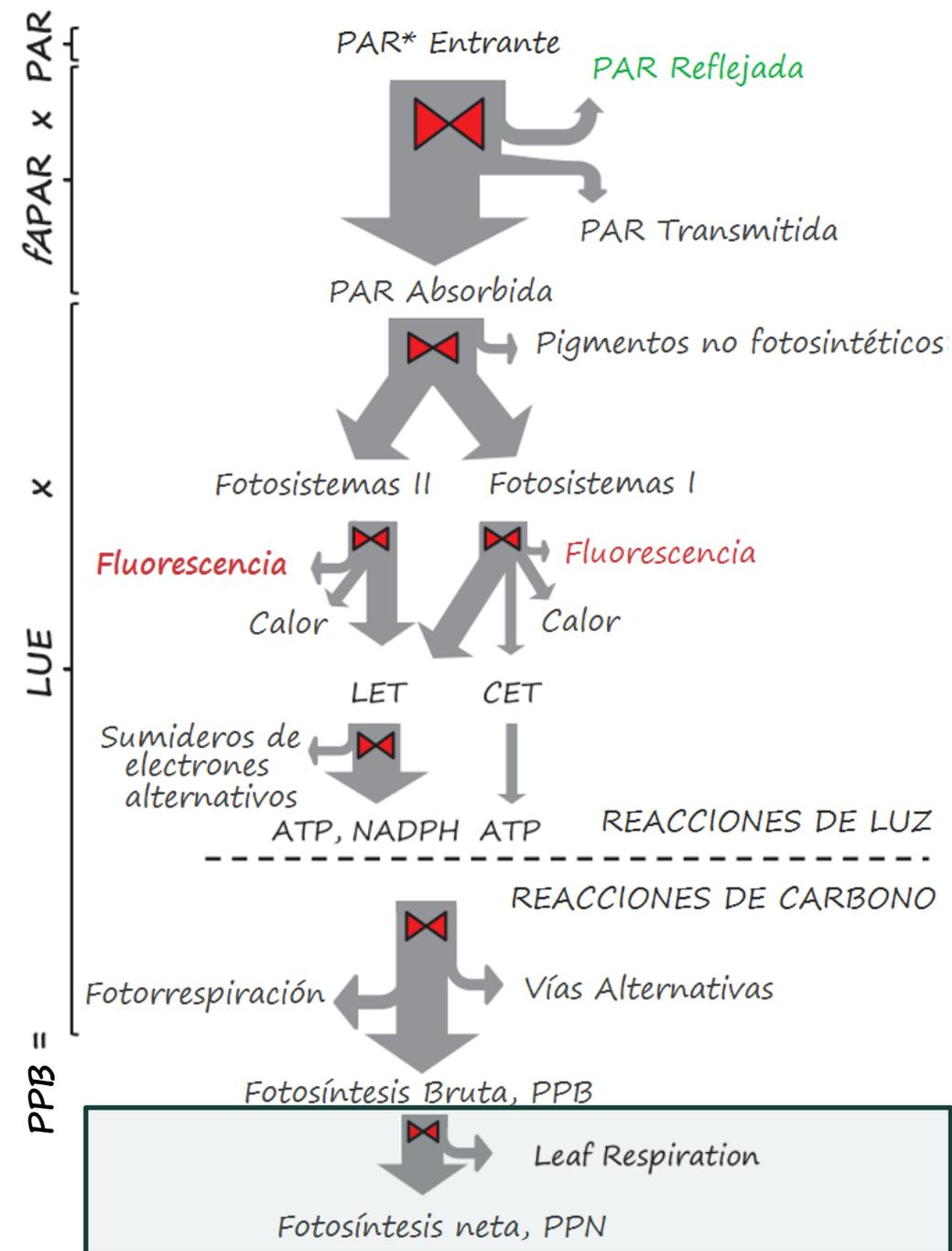
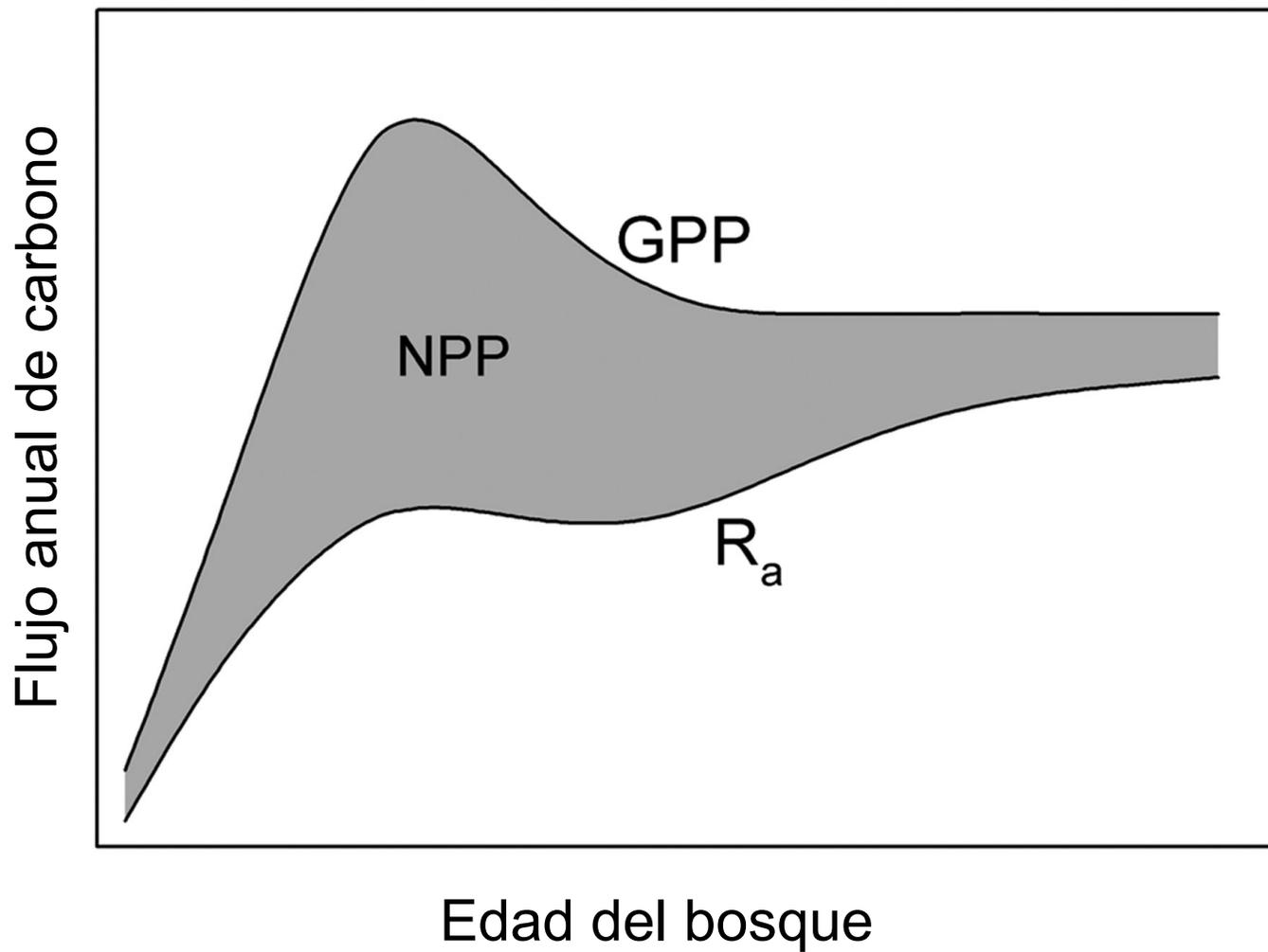
\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)



**Figura 2.2.21** La producción neta del ecosistema (NEP por sus siglas en inglés) es igual al intercambio neto del ecosistema (NEE por sus siglas en inglés) menos las pérdidas por lixiviación incluyendo pérdidas o ganancias por transferencias laterales de carbono. NEP es equivalente a la cantidad de carbono acumulada en el material orgánico (vivo y muerto) durante el período estipulado (normalmente 1 año. complejo de evolución de oxígeno



\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)



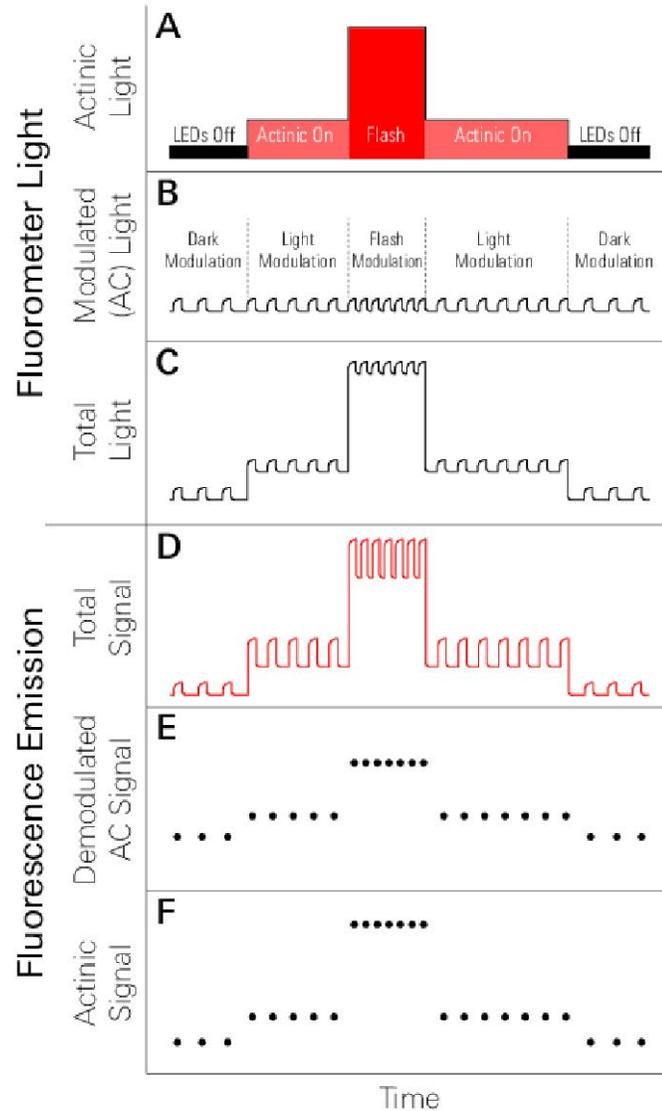
\*(PAR: Siglas en inglés de Radiación fotosintéticamente activa)

# Entonces, ¿qué nos enseña la fluorescencia sobre la fotosíntesis?

- Comencemos con los métodos activos que se utilizan hace décadas
- ... y luego pasaremos a la fluorescencia inducida por el sol y lo que podemos aprender de ella (y qué diferencia hay entre esta y los métodos activos)



# Fluorimetría Activa (Décadas de Investigación)



# El Poder de la Fluorimetría Activa

## ► Rendimiento de Fluorescencia

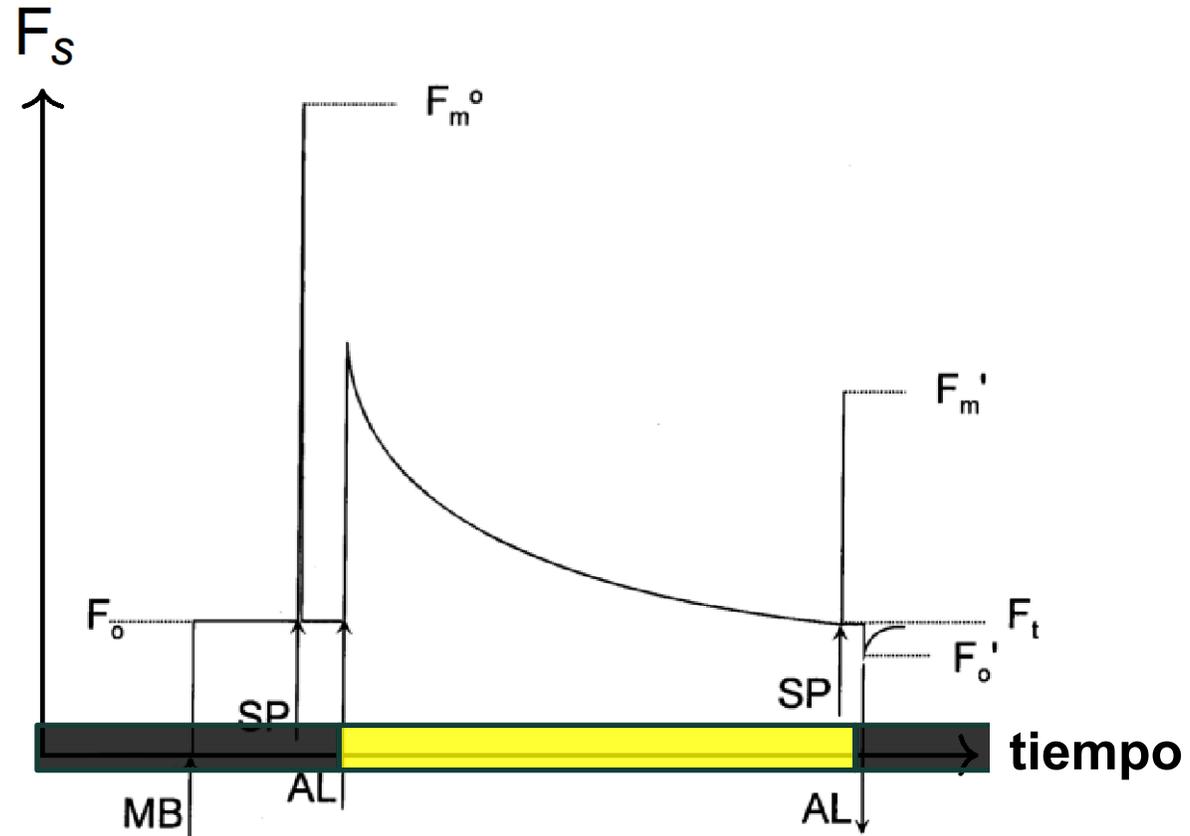
$$\Phi_f = \frac{K_f}{K_f + K_p + K_n}$$

► Tasas para:

► Fluorescencia:

► Fotosíntesis:

► Disipación del calor: (NPQ)



De Maxwell y Johnson 2000

AL = Luz Actínica (luz moderada fue encendida “ y apagada #)

SP = Pulso Saturante (luz intensa pulsada a cada “ )



# El Poder de la Fluorimetría Activa

## ► Rendimiento de Fluorescencia

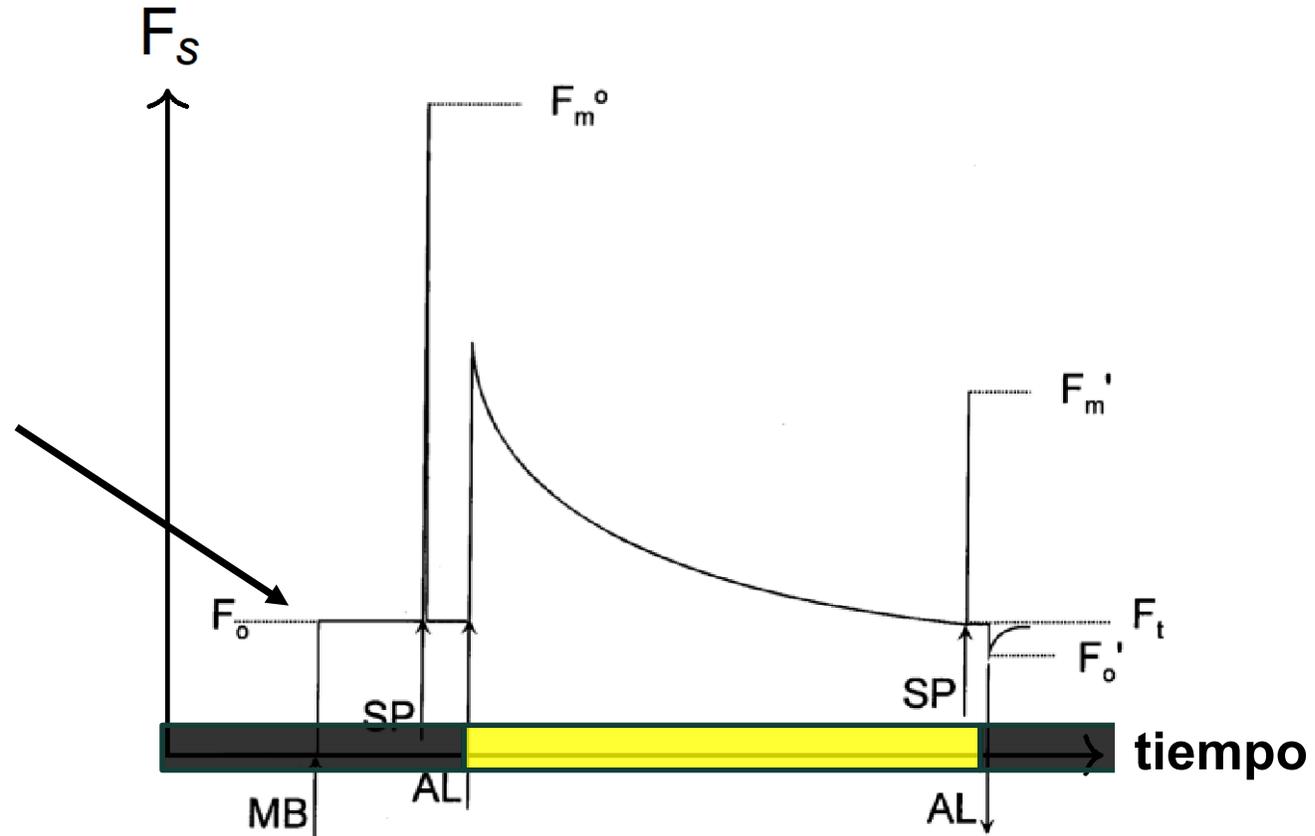
$$\Phi_f = \frac{K_f}{K_f + K_p + \cancel{K_n}}$$

► Tasas para:

► Fluorescencia:

► Fotosíntesis:

► Disipación del calor: (NPQ)



De Maxwell y Johnson 2000

AL = Luz Actínica (luz moderada fue encendida " y apagada #)

SP = Pulso Saturante (luz intensa pulsada a cada " )



# El Poder de la Fluorimetría Activa

## ► Rendimiento de Fluorescencia

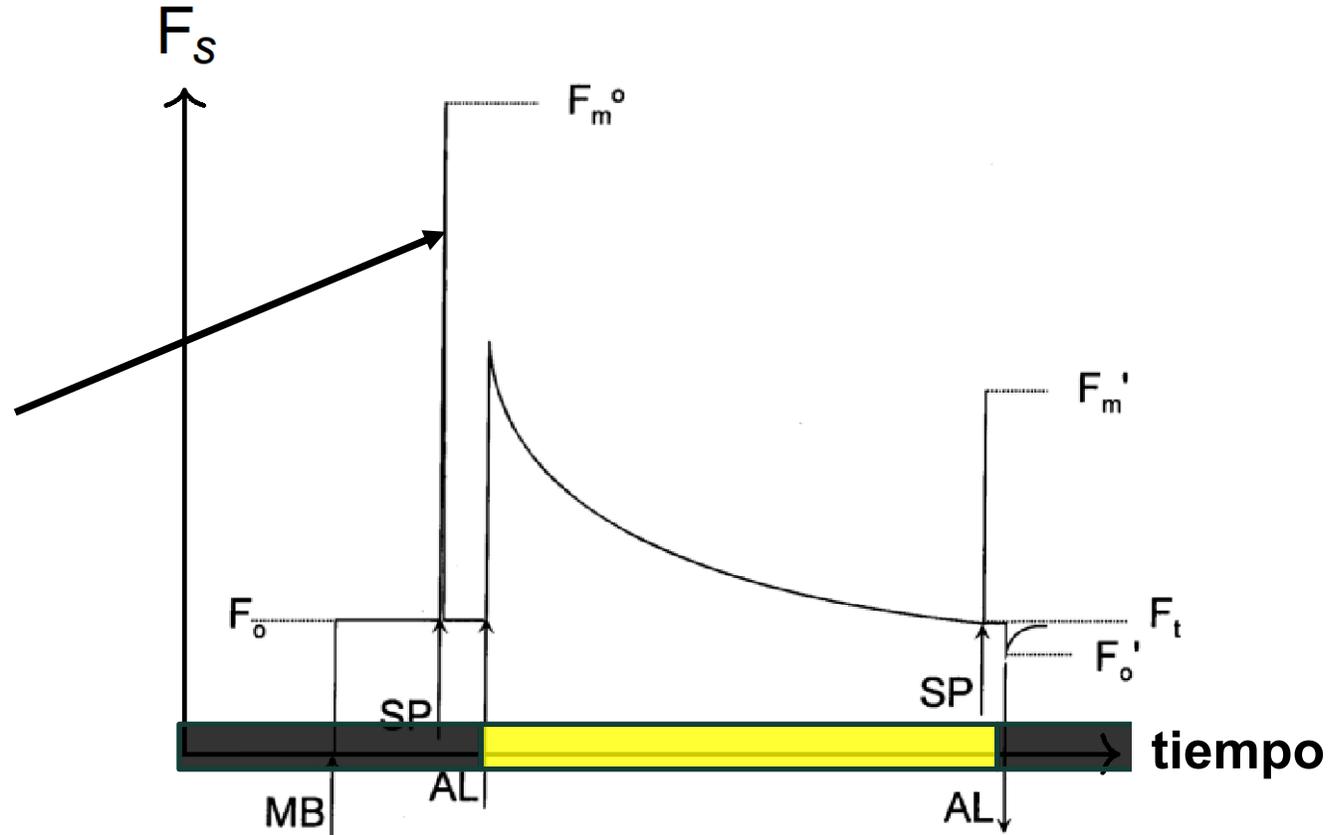
$$\Phi_f = \frac{K_f}{K_f + \cancel{K_p} + \cancel{K_n}}$$

► Tasas para:

► Fluorescencia:

► Fotosíntesis:

► Disipación del calor: (NPQ)



De Maxwell y Johnson 2000

AL = Luz Actínica (luz moderada fue encendida “ y apagada #)

SP = Pulso Saturante (luz intensa pulsada a cada “ )



# El Poder de la Fluorimetría Activa

## ► Rendimiento de Fluorescencia

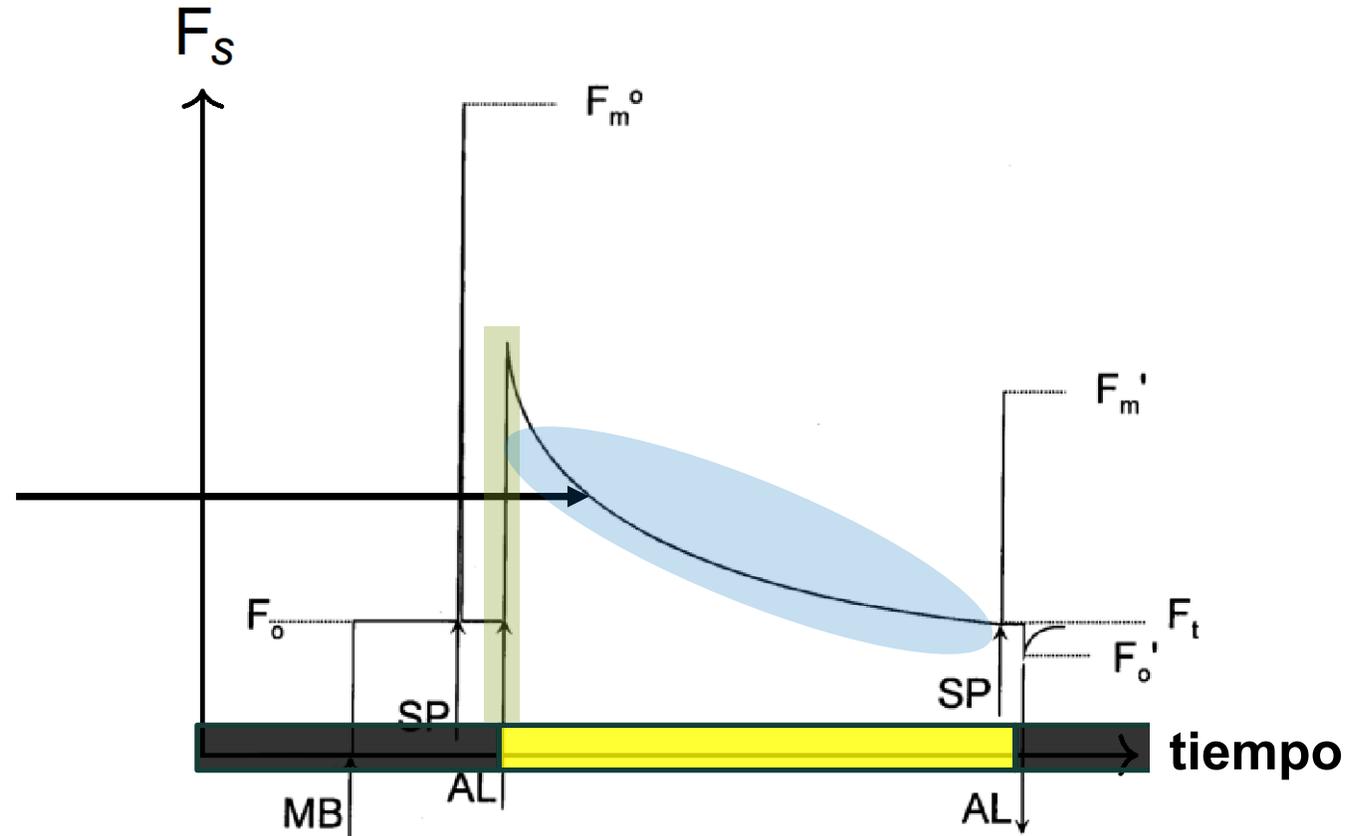
$$\Phi_f = \frac{K_f}{K_f + K_p + K_n}$$

► Tasas para:

► Fluorescencia:

► Fotosíntesis:

► Disipación del calor: (NPQ)



De Maxwell y Johnson 2000

AL = Luz Actínica (luz moderada fue encendida “ y apagada #)

SP = Pulso Saturante (luz intensa pulsada a cada “ )



# El Poder de la Fluorimetría Activa

## ► Rendimiento de Fluorescencia

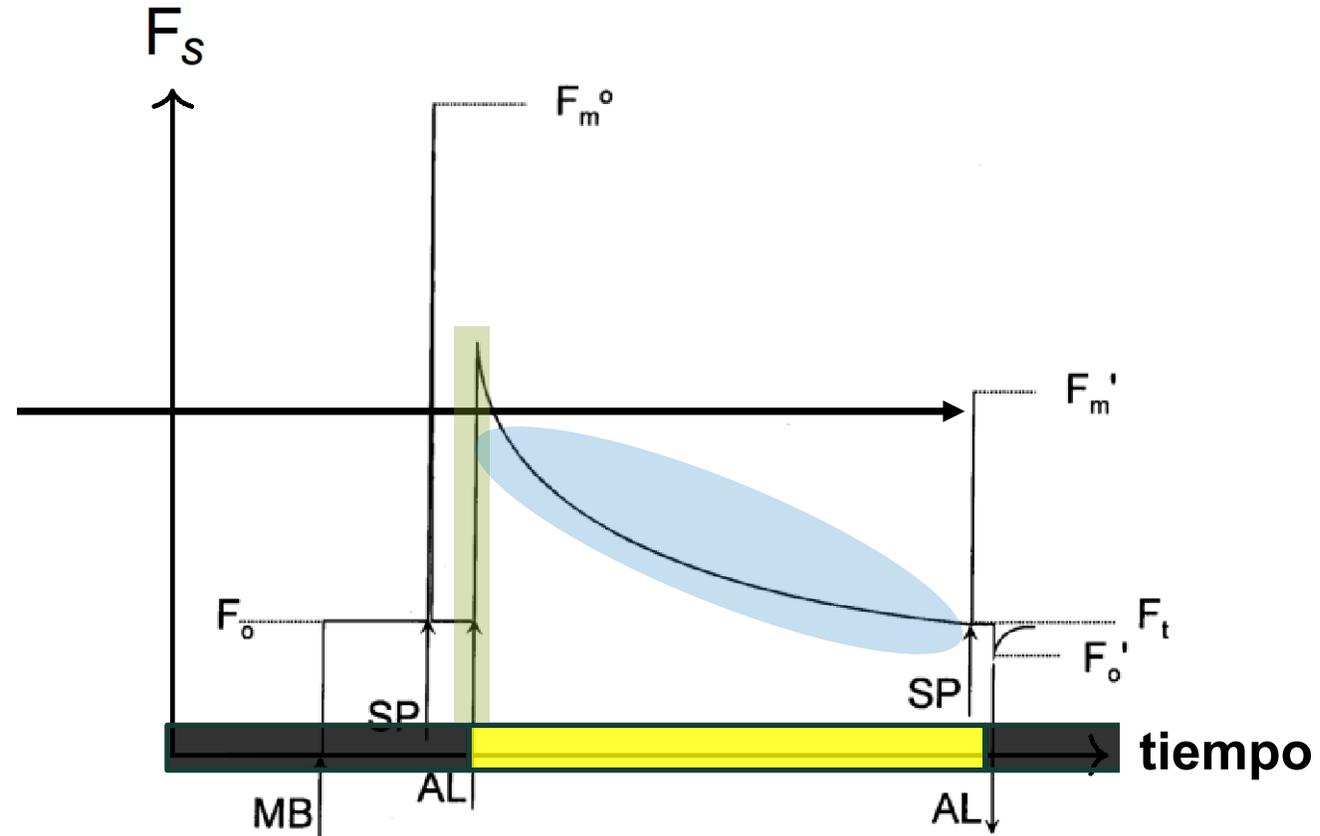
$$\Phi_f = \frac{K_f}{K_f + \cancel{K_p} + K_n}$$

► Tasas para:

► Fluorescencia:

► Fotosíntesis:

► Disipación del calor: (NPQ)



De Maxwell y Johnson 2000

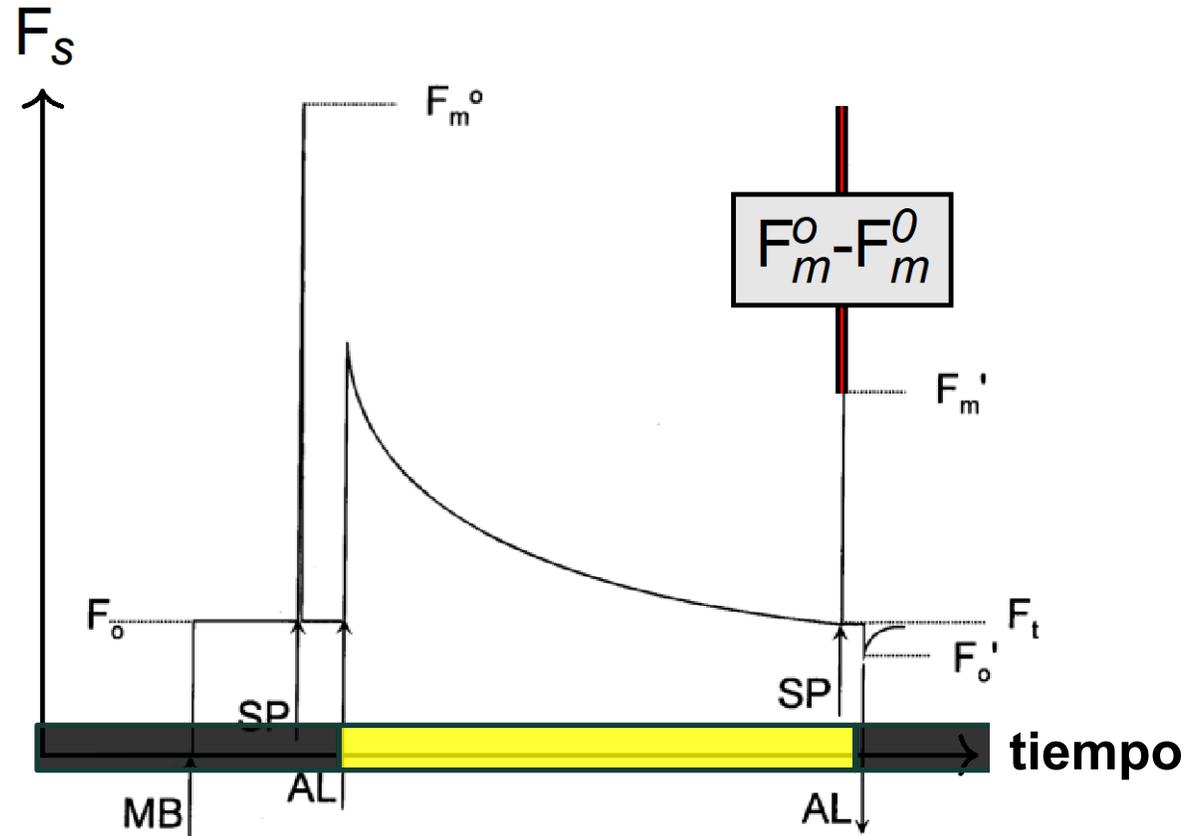
AL = Luz Actínica (luz moderada fue encendida " y apagada #)

SP = Pulso Saturante (luz intensa pulsada a cada " )



# El Poder de la Fluorimetría Activa

$$NPQ = (F_m^0 - F_m^0) / F_m^0$$



De Maxwell y Johnson 2000

AL = Luz Actínica (luz moderada fue encendida “ y apagada #)

SP = Pulso Saturante (luz intensa pulsada a cada “ )



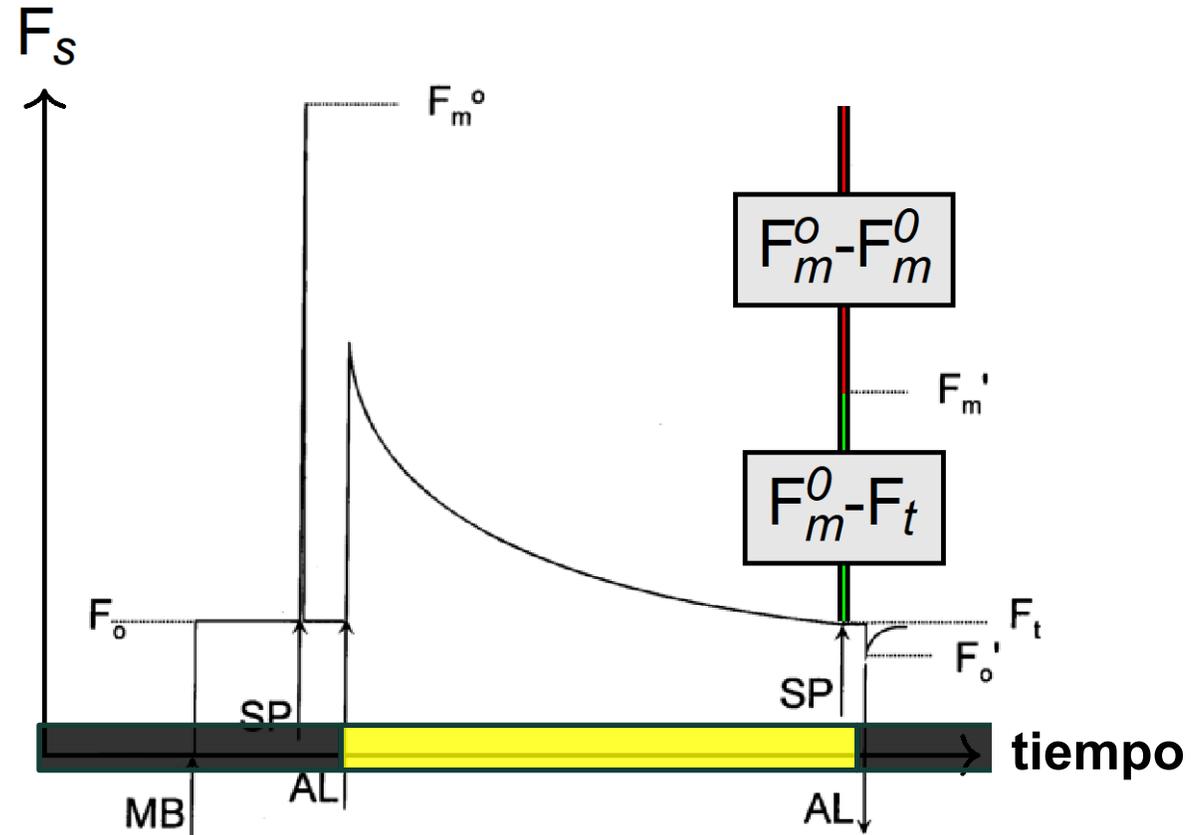
# El Poder de la Fluorometría Activa

I 
$$NPQ = (F_m^0 - F_m^0) / F_m^0$$

I 
$$\Phi_{PSII} = (F_m^0 - F_t) / F_m^0$$

Genty, Briantais, Baker (1988), > 5000

citaciones



De Maxwell y Johnson 2000

AL = Luz Actínica (luz moderada fue encendida “ y apagada #)

SP = Pulso Saturante (luz intensa pulsada a cada “ )





# El Poder de la Fluorimetría Activa

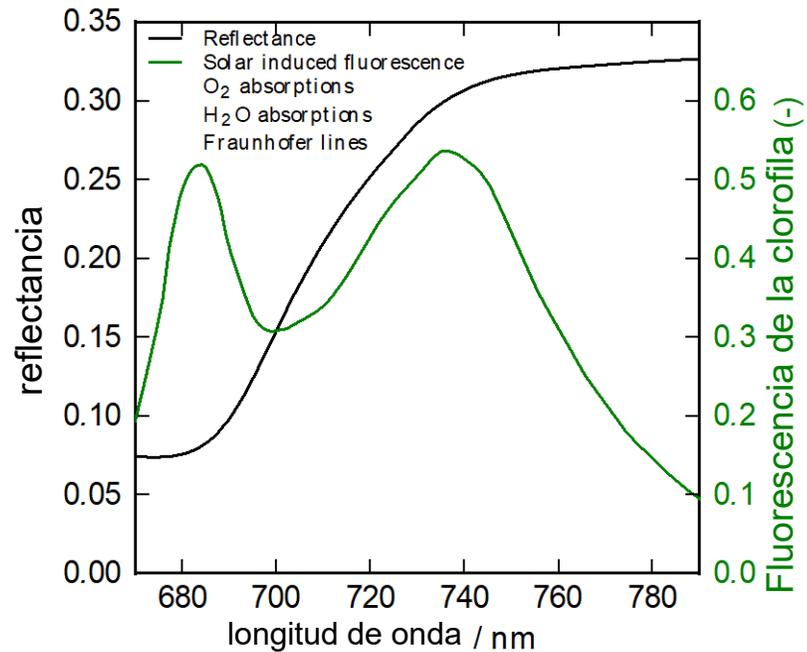
Con la fluorescencia activa, la eficiencia de PSII y por lo tanto el transporte de electrones se puede calcular directamente con

$$J = \Phi_{PSII} * APAR * \beta$$

con  $\beta$  siendo la fracción de luz absorbida por PSII (re PSI, se acostumbra suponer que es 0.5 como promedio)



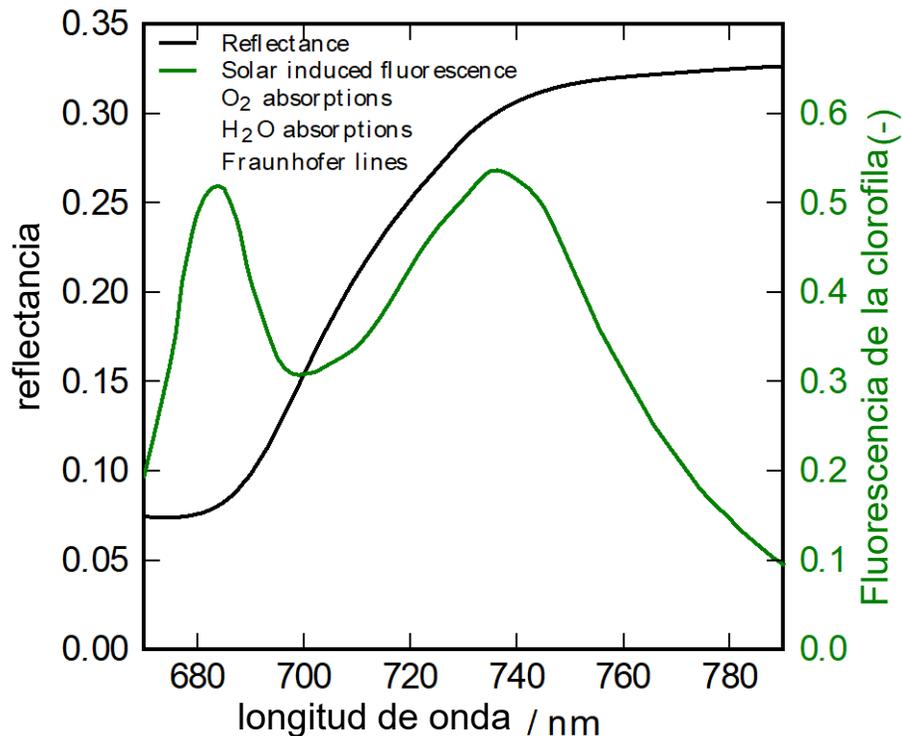
# FLUORESCENCIA INDUCIDA POR EL SOL (ABSOLUTA)



$$SIF = PAR \cdot fPAR \cdot \Phi_f$$

# FLUORESCENCIA INDUCIDA POR EL SOL (ABSOLUTA)

## I Radiación Fotosintéticamente Activa



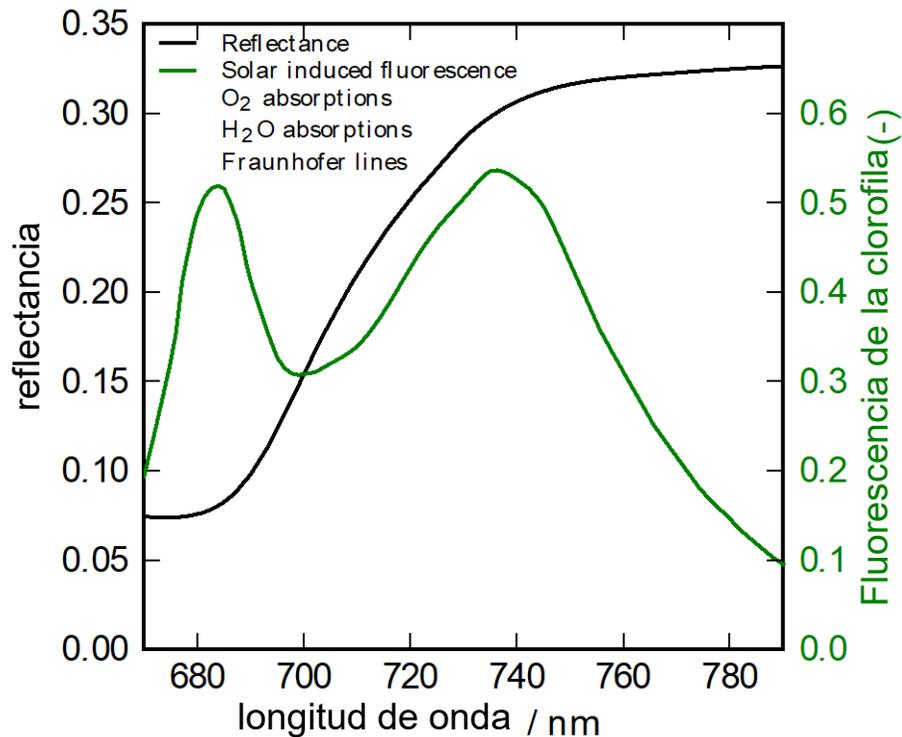
$$\text{SIF} = \text{PAR} \cdot \text{fPAR} \cdot \Phi_f$$

- I Fracción de PAR absorbida
- I fPAR se puede estimar a partir del NDVI\* (¡con algunas cautelas!)

\* NDVI- Índice de vegetación diferencial normalizado, por sus siglas en inglés

# FLUORESCENCIA INDUCIDA POR EL SOL (ABSOLUTA)

## I Radiación Fotosintéticamente Activa



$$\text{SIF} = \text{PAR} \cdot f\text{PAR} \cdot \Phi_f$$

## I Fracción de PAR absorbida

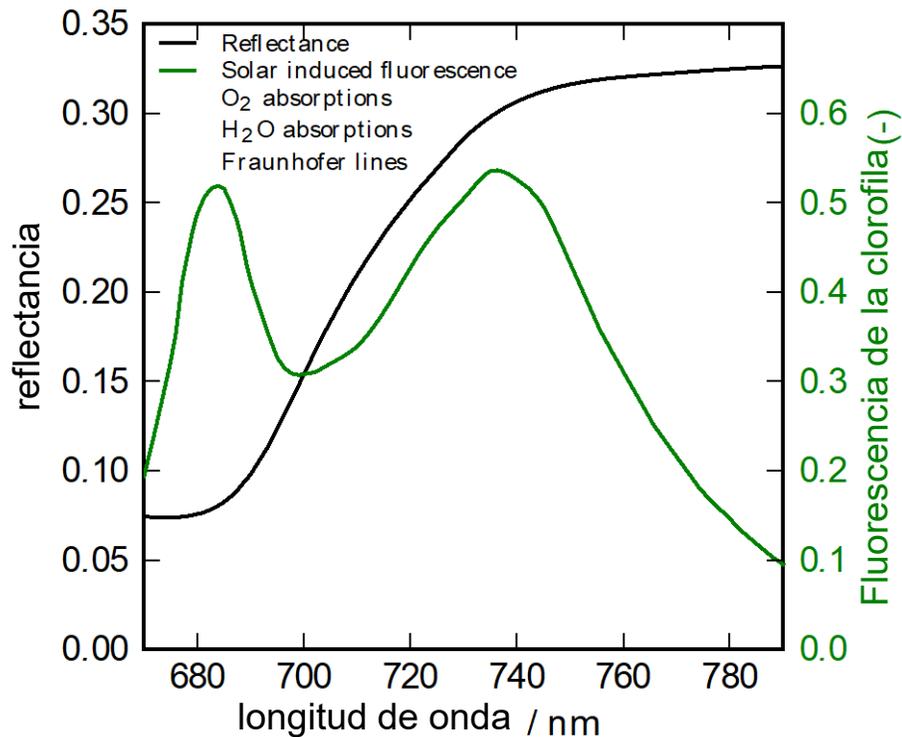
I fPAR se puede estimar a partir del NDVI\* (¡con algunas precauciones!)

$$\text{GPP} = \text{PAR} \cdot f\text{PAR} \cdot \Phi_p$$

\* NDVI- Índice de vegetación diferencial normalizado, por sus siglas en inglés

# FLUORESCENCIA INDUCIDA POR EL SOL (ABSOLUTA)

## I Radiación Fotosintéticamente Activa



$$\text{SIF} = \text{PAR} \cdot \text{fPAR} \cdot \Phi_f$$

## I Fracción de PAR absorbida

I fPAR se puede estimar a partir del NDVI\* (¡con algunas precauciones!)

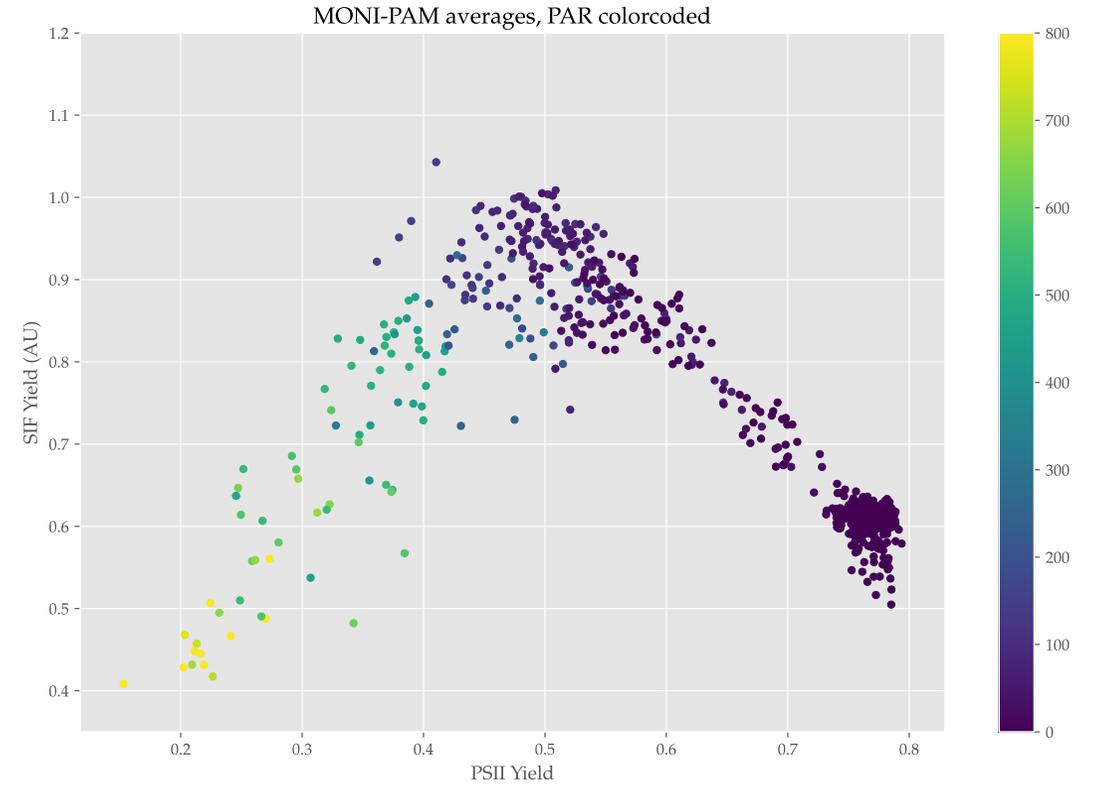
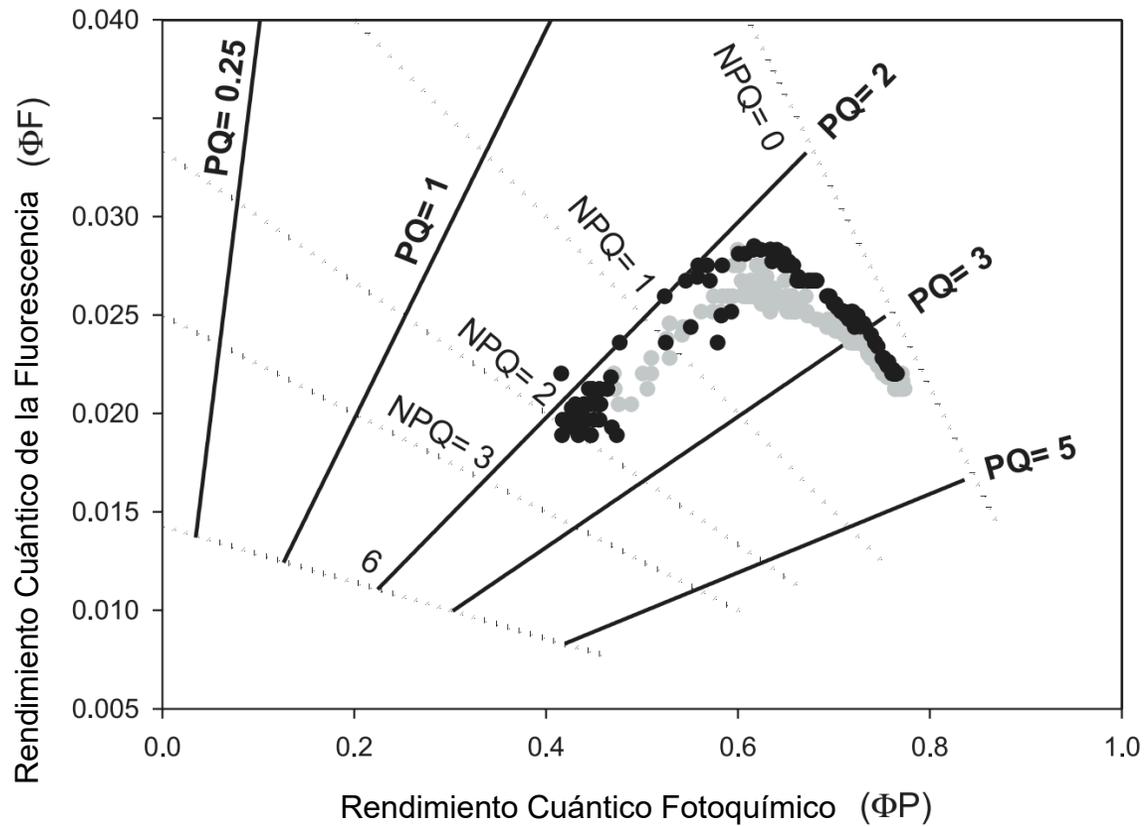
$$\text{GPP} = \text{PAR} \cdot \text{fPAR} \cdot \Phi_p$$

$$\text{GPP} = \text{SIF} \cdot \Phi_p / \Phi_f$$

\* NDVI- Índice de vegetación diferencial

# La Relación entre la Fluorescencia y los Rendimientos Fotosintéticos

4086 | Porcar-Castell *et al.*



# Como Medimos SIF?

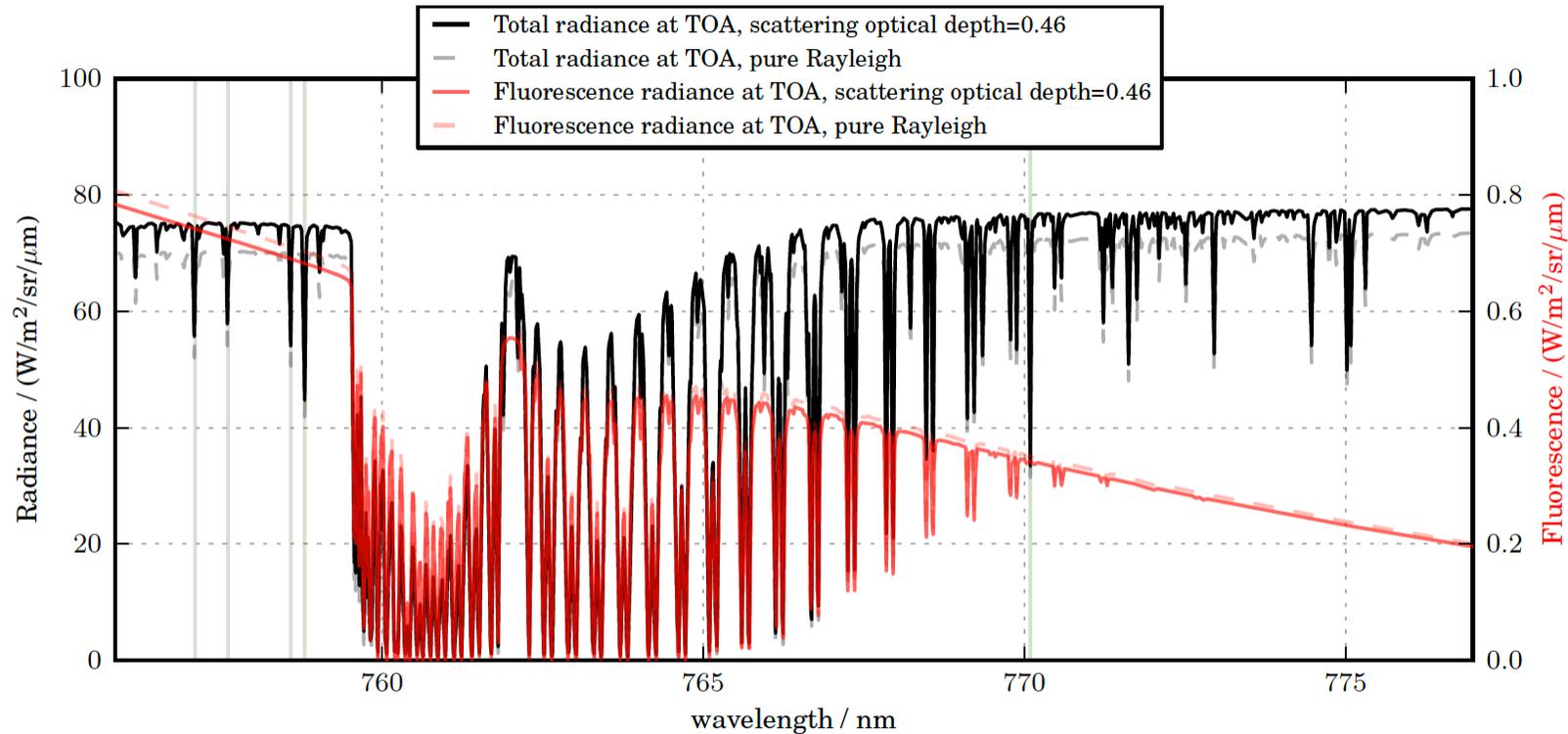
- De la parte teórica de SIF a como medirlo



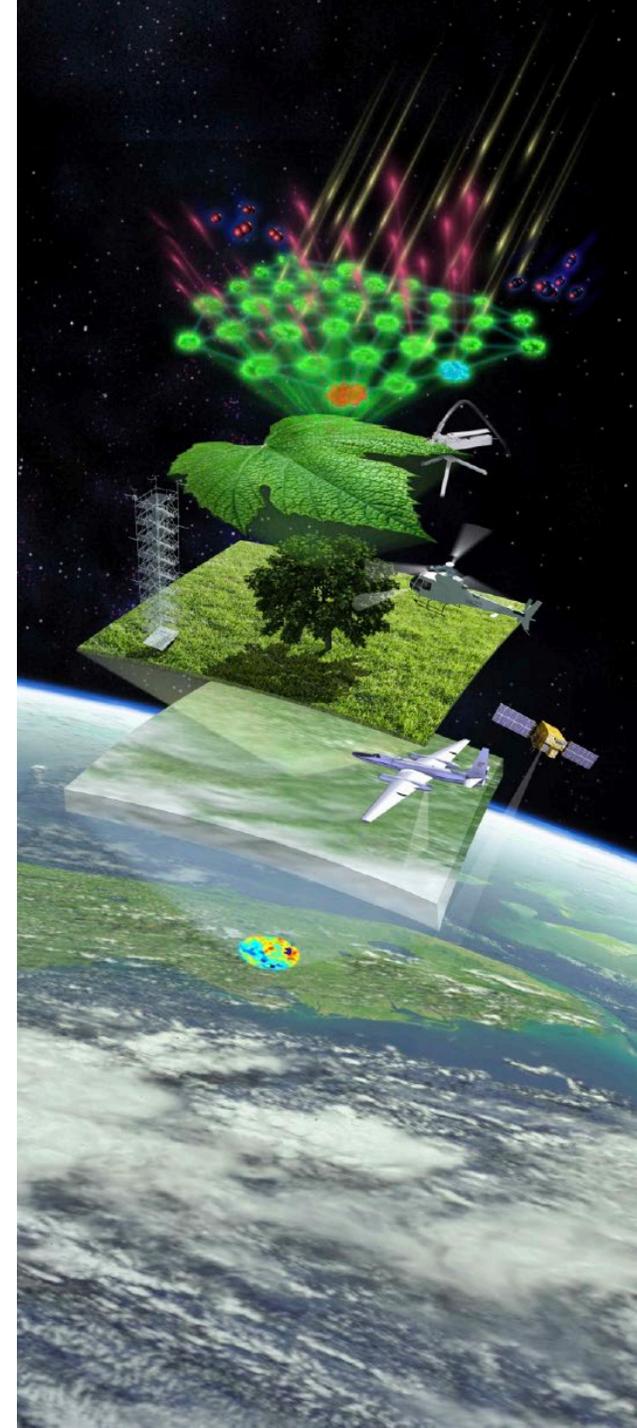


# ¿Cómo medimos este tenue brillo remotamente?

(Agrega apenas el 1% a la señal total. Imagínese algo como encender una lámpara en una habitación soleada.)



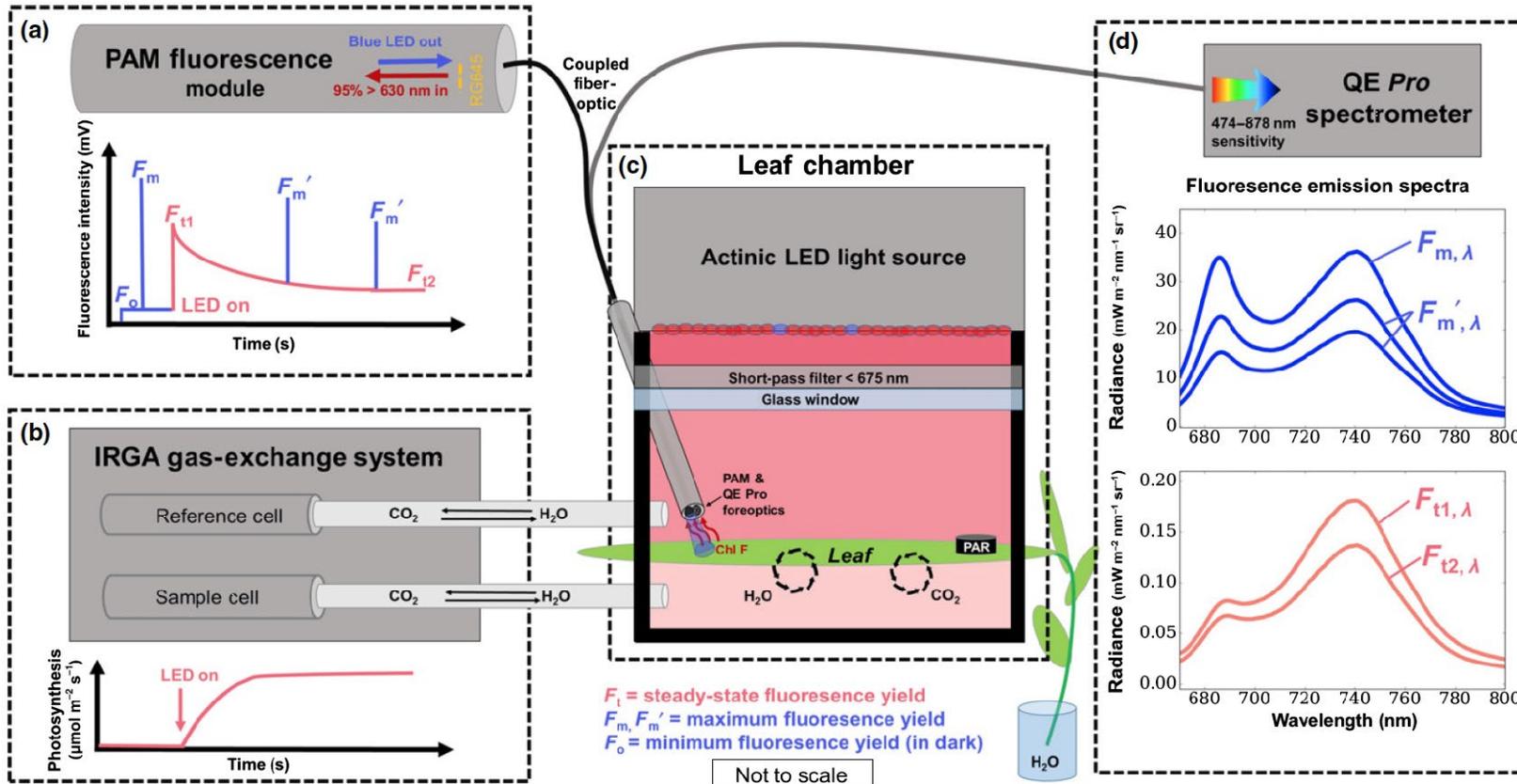
Frankenberg et al, AMT (2012)



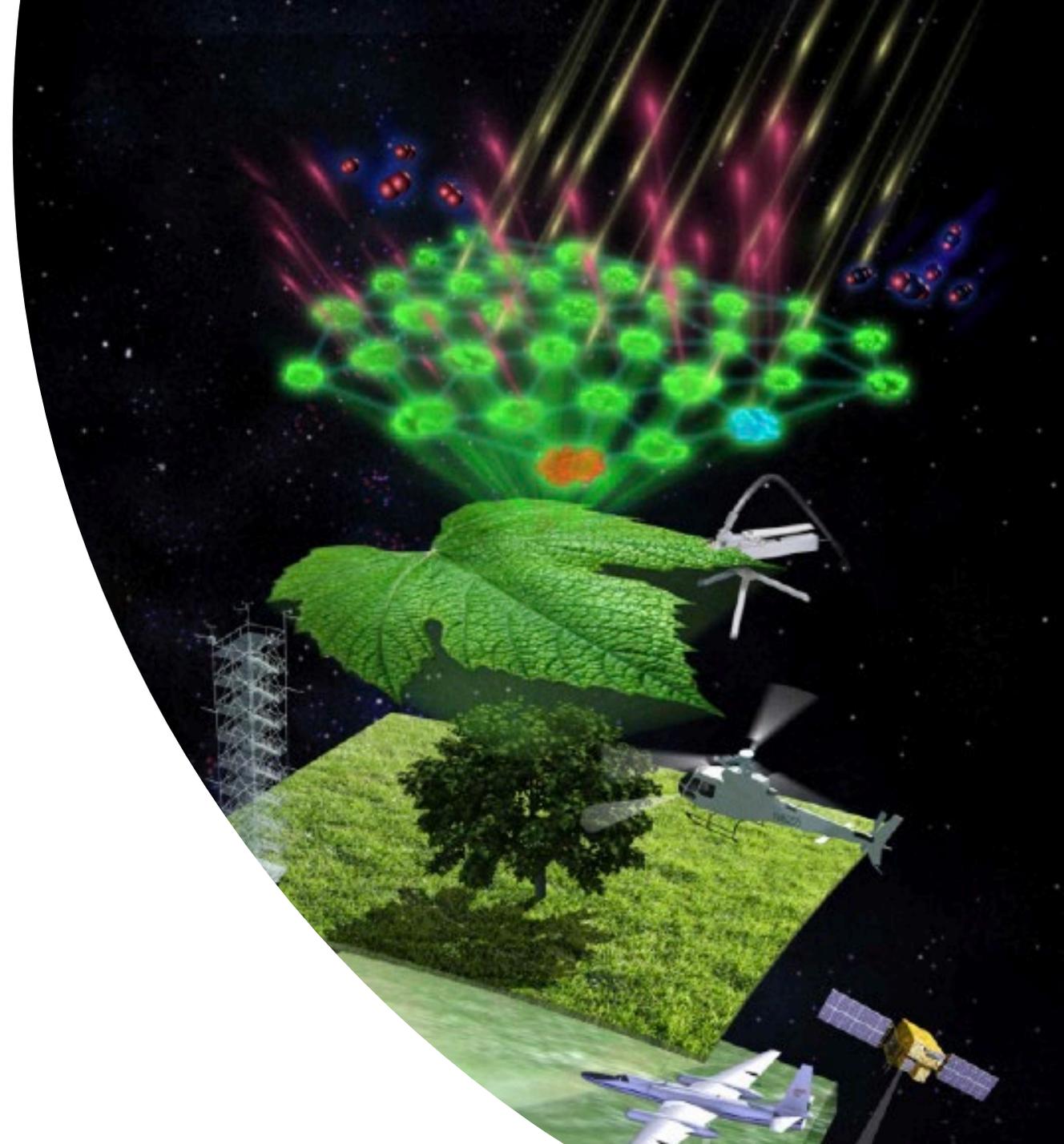
## Métodos

# Conectando la fluorescencia activa a la pasiva con la fotosíntesis: un método para evaluar mediciones de teledetección de la fluorescencia de la clorofila

Troy S. Magney<sup>1</sup>, Christian Frankenberg<sup>1,2</sup>, Joshua B. Fisher<sup>1</sup>, Ying Sun<sup>1,3</sup>, Gretchen B. North<sup>4</sup>, Thomas S. Davis<sup>5</sup>, Ari Kornfeld<sup>6</sup> and Katharina Siebke<sup>7</sup>

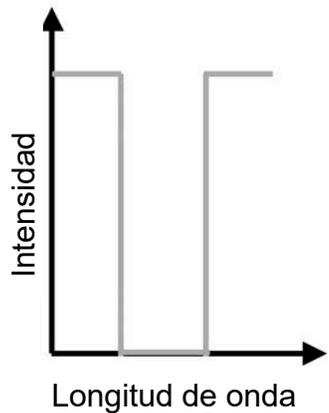
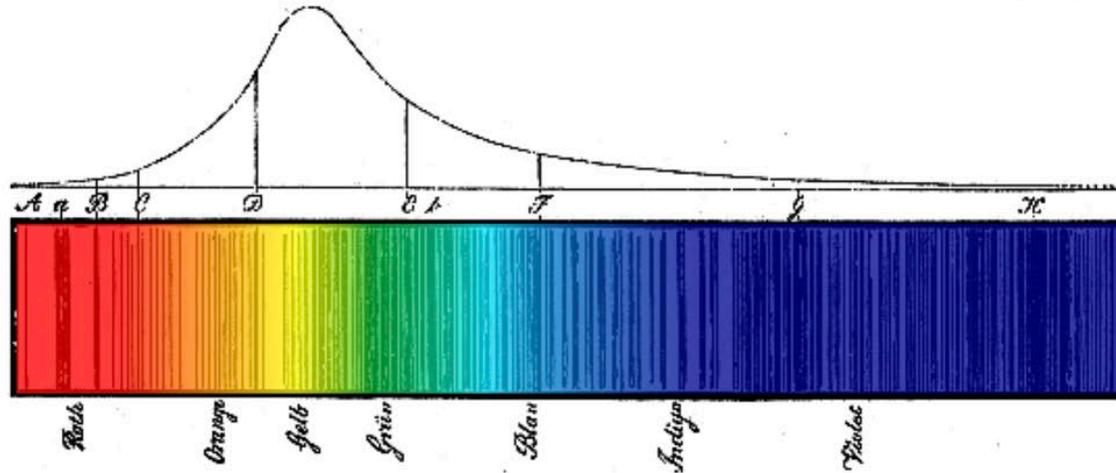


**¡Necesitamos  
una cortina!**

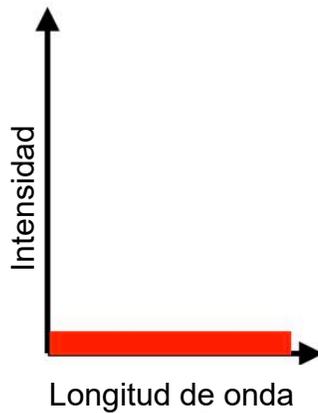


# ¡Podemos usar un “cuarto oscuro” en el espacio espectral!

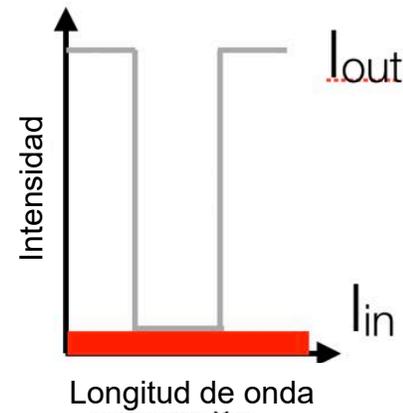
¡¡El sol nos sirvió de filtro pasa banda (aunque imperfecto)!!



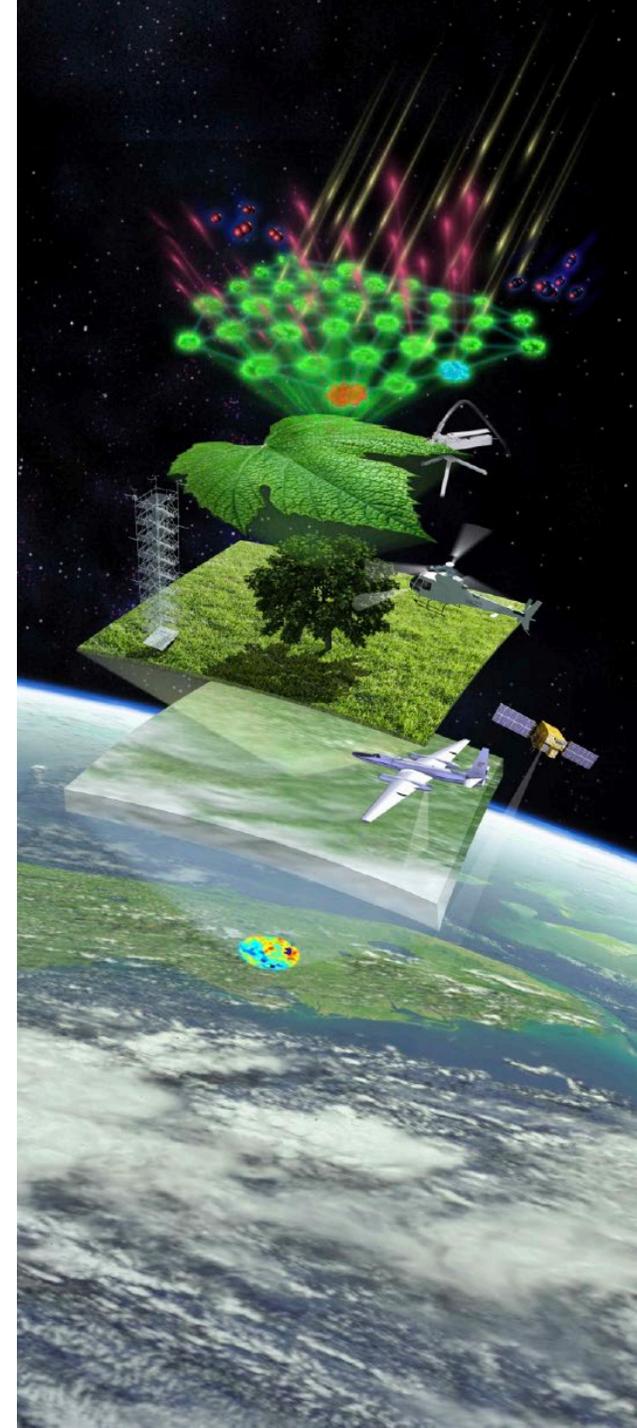
+



=

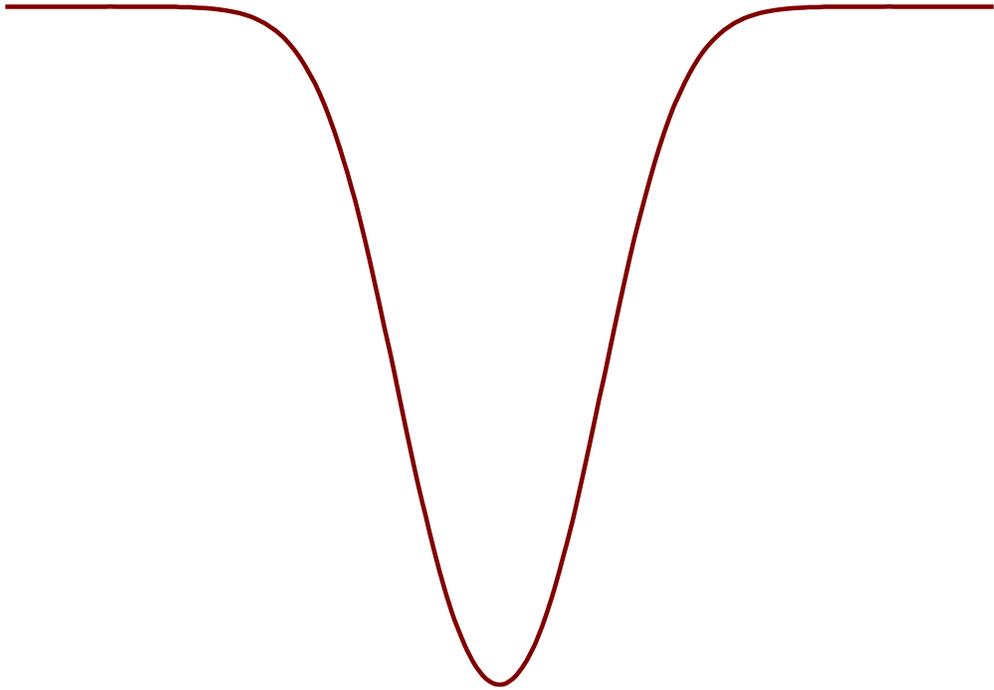


$I_{in}/I_{out}$   
¡cambios!



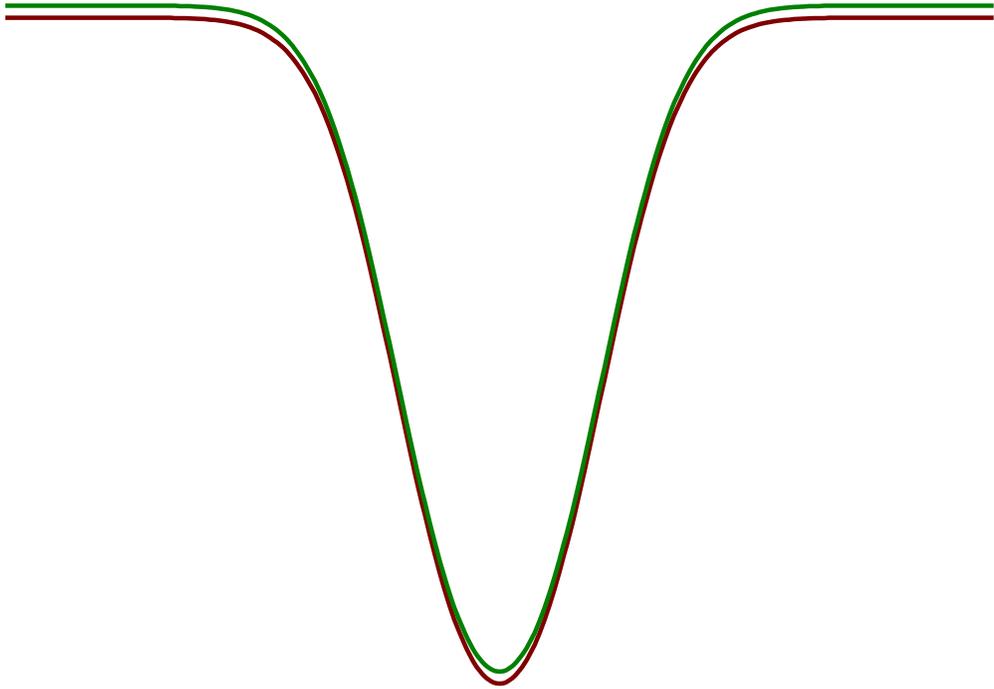
# El Impacto de la Fluorescencia en la Línea Fraunhofer?

- ▶ Línea Fraunhofer



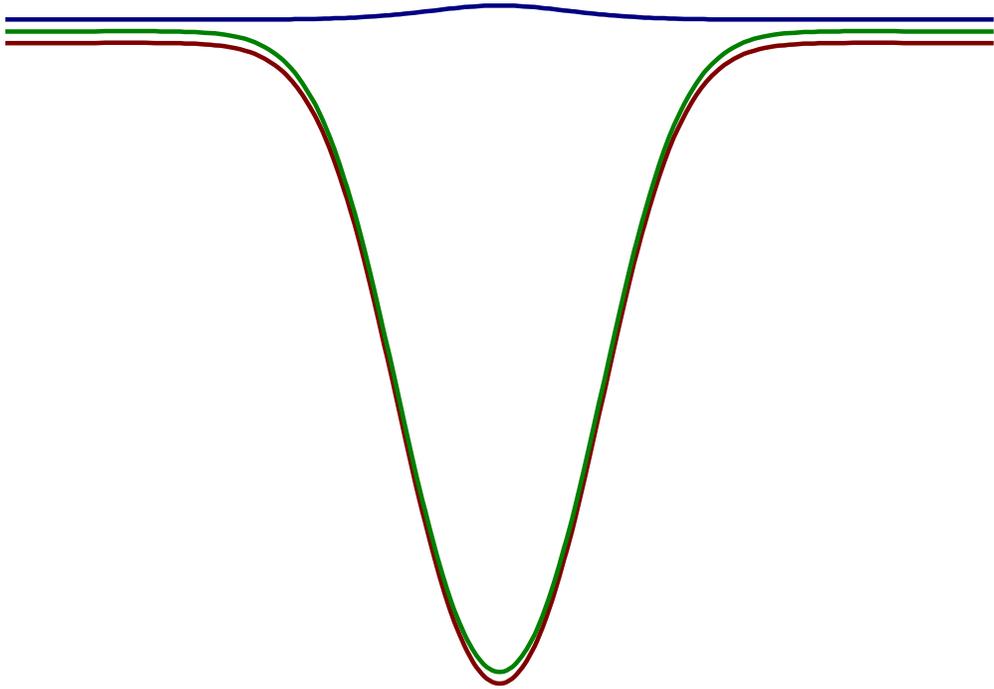
# El Impacto de la Fluorescencia en la Línea Fraunhofer?

- ▶ Línea Fraunhofer
- ▶ Término de Fluorescencia Sumado

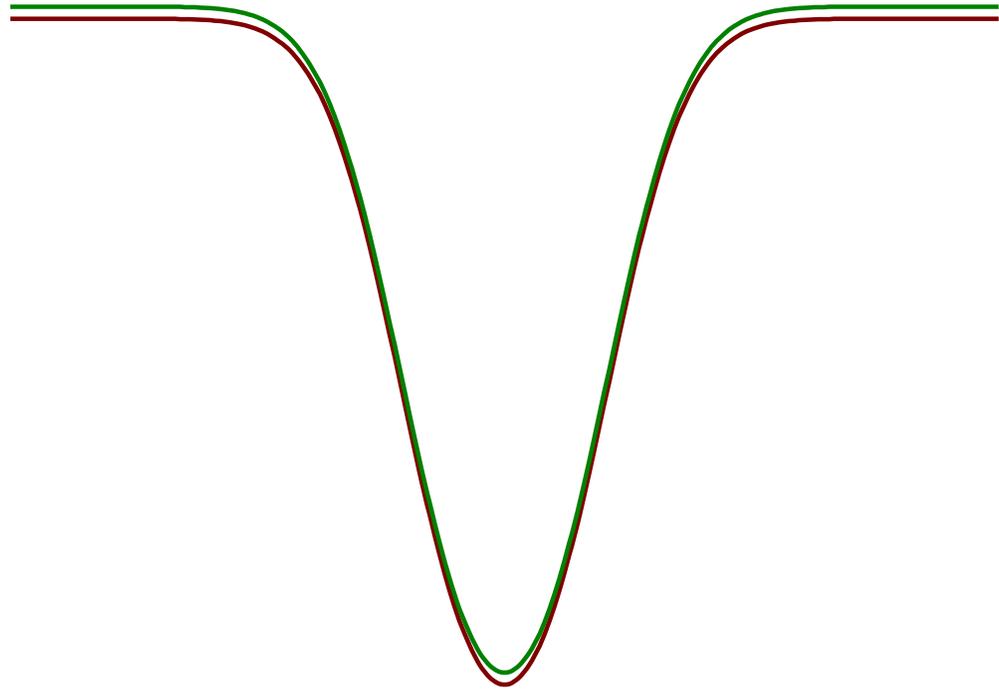


# El Impacto de la Fluorescencia en la Línea Fraunhofer?

- ▶ Línea Fraunhofer
- ▶ Término de Fluorescencia Sumado
- ▶ Relación de los espectros con y sin la fluorescencia



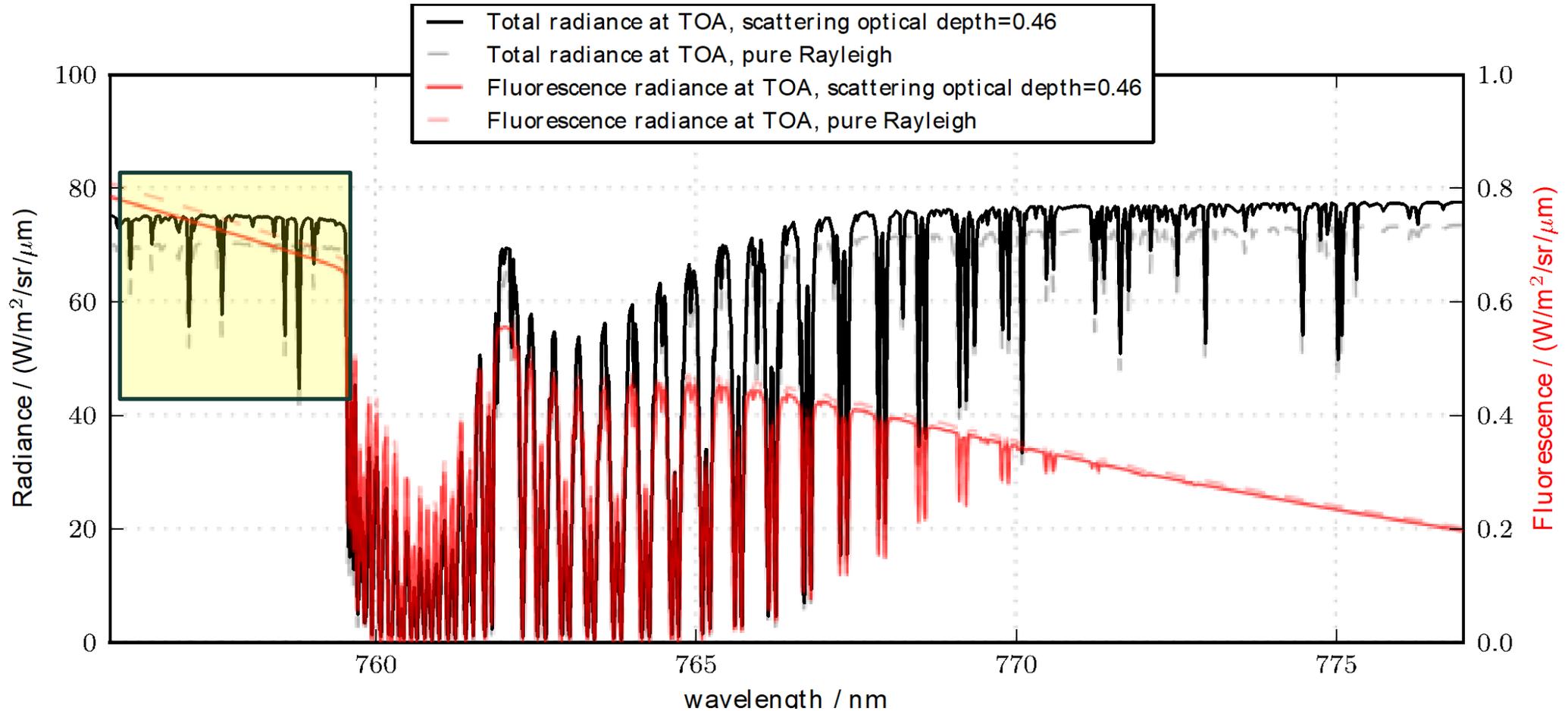
# El Impacto de la Fluorescencia en la Línea Fraunhofer?



- ▶ Línea Fraunhofer
- ▶ Término de Fluorescencia Sumado
- ▶ Relación de los espectros con y sin la fluorescencia
- ▶ Al acomodar este *rellenado*, podemos derivar la emisión de fluorescencia. En principio, no importa si observamos una hoja, un árbol, un ecosistema o un hemisferio, la medición de la emisión total no debería ser sesgada.



# Información Contextual: Midiendo la Fluorescencia



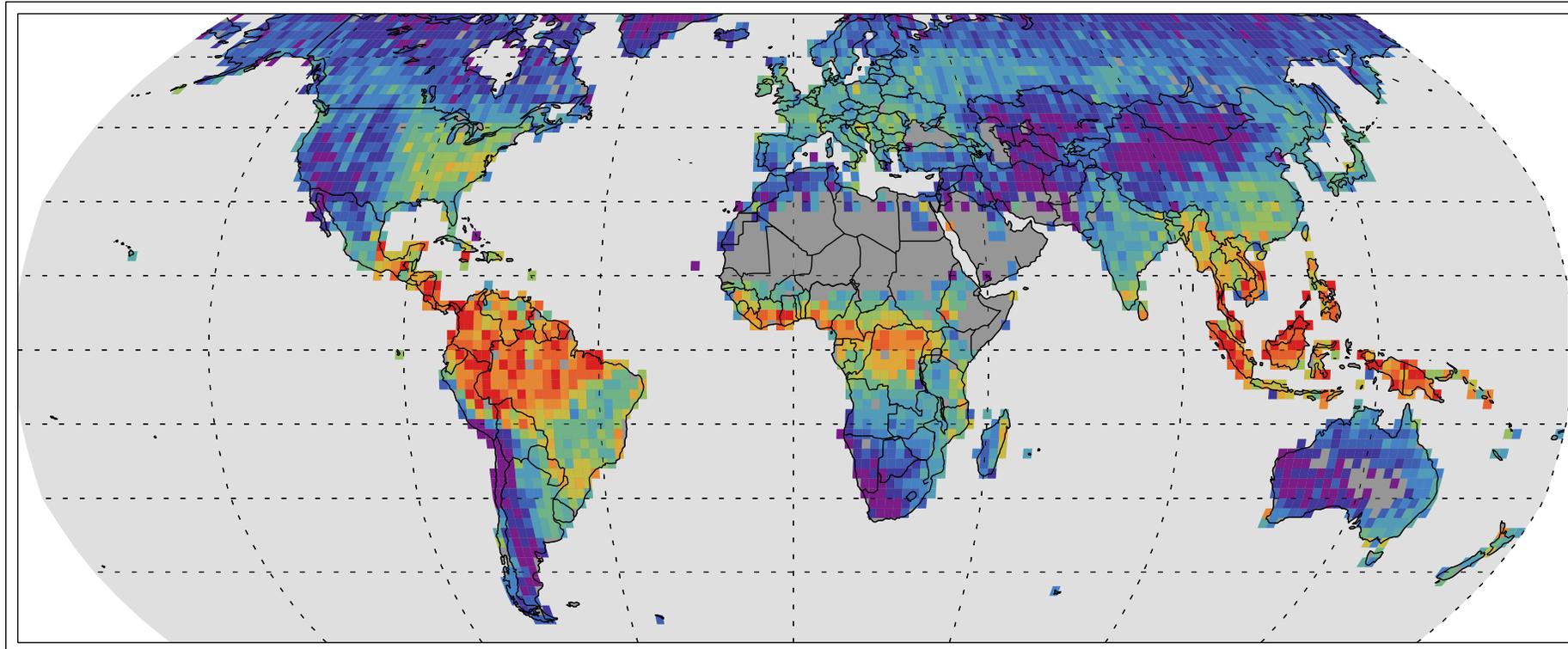
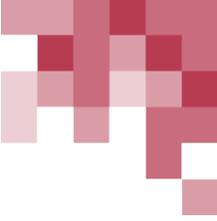
Frankenberg, O'Dell, Guanter, et al (2011)

Chlorophyll fluorescence remote sensing from space in scattering atmospheres: Implications for its retrieval and interferences with atmospheric  $CO_2$  retrievals.



# Historia de la Evolución de la Medición de SIF

Joiner et al, Frankenberg et al



GOSAT

$F_s / (\text{W m}^{-2} \text{ micron}^{-1} \text{ sr}^{-1})$

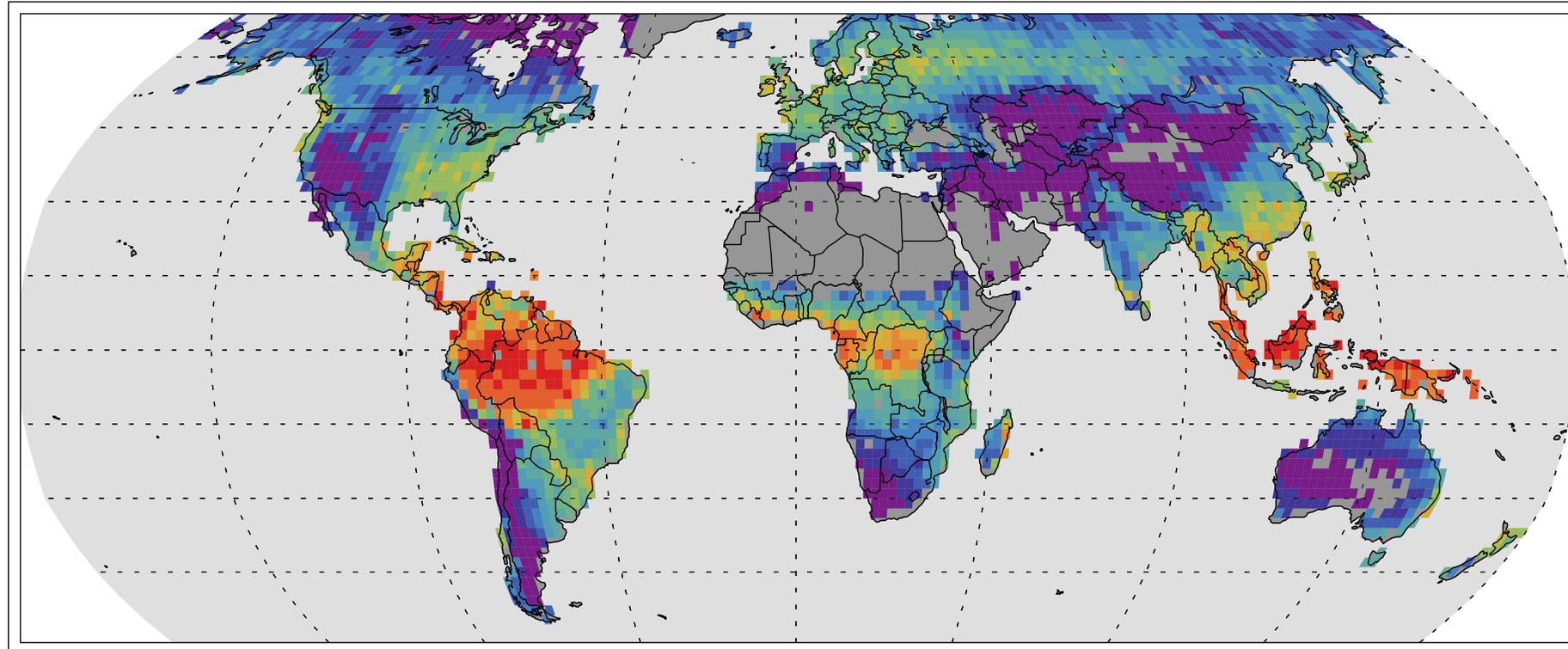


Frankenberg et al, GRL (2011b)



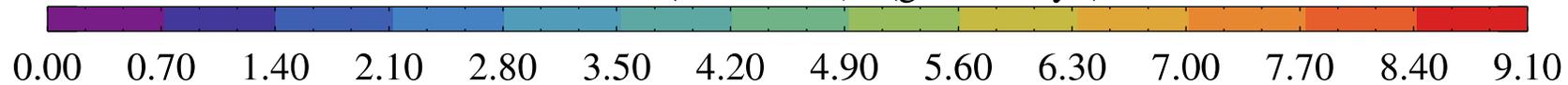
# Historia de la Evolución de la Medición de la SIF

Joiner et al, Frankenberg et al



GOSAT

Model GPP (MPI-BGC) / ( $\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )



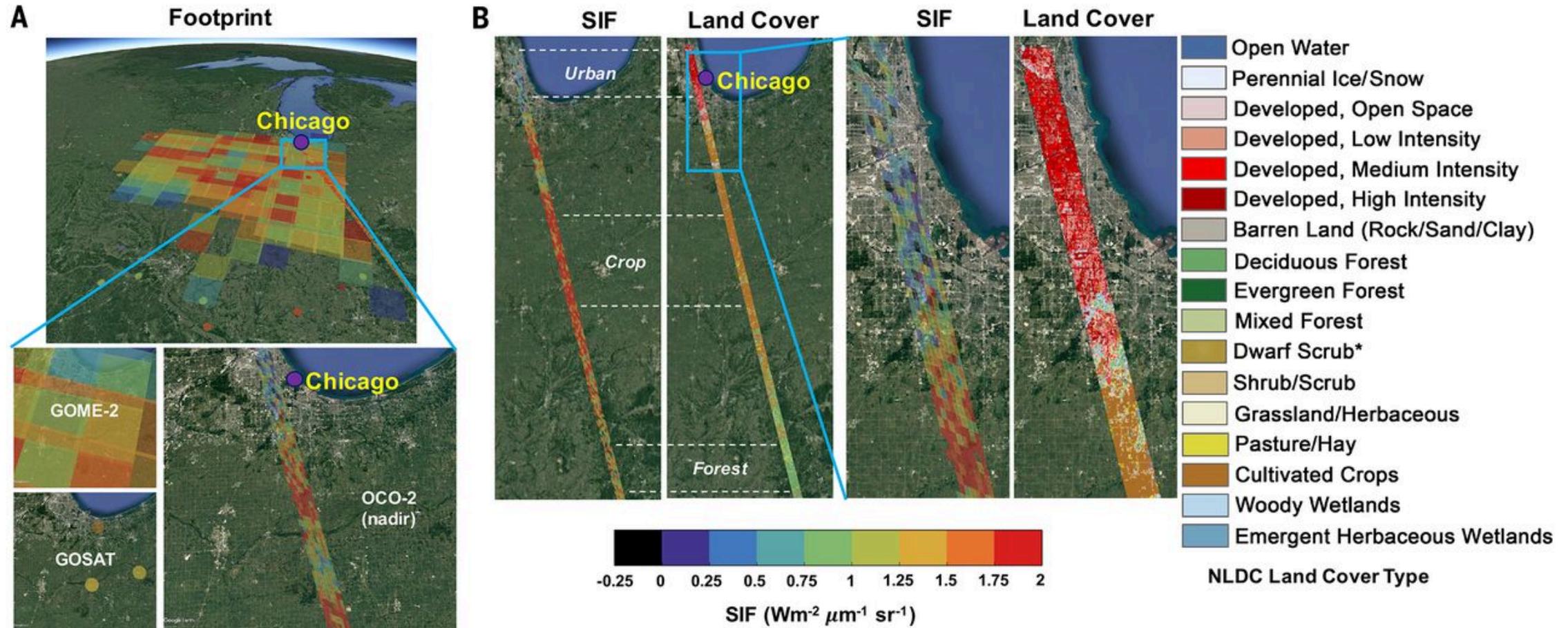
Frankenberg et al, GRL (2011b)



# Historia de la Evolución de la Medición de la SIF

Sun et al

OCO-2

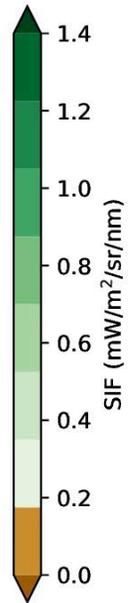
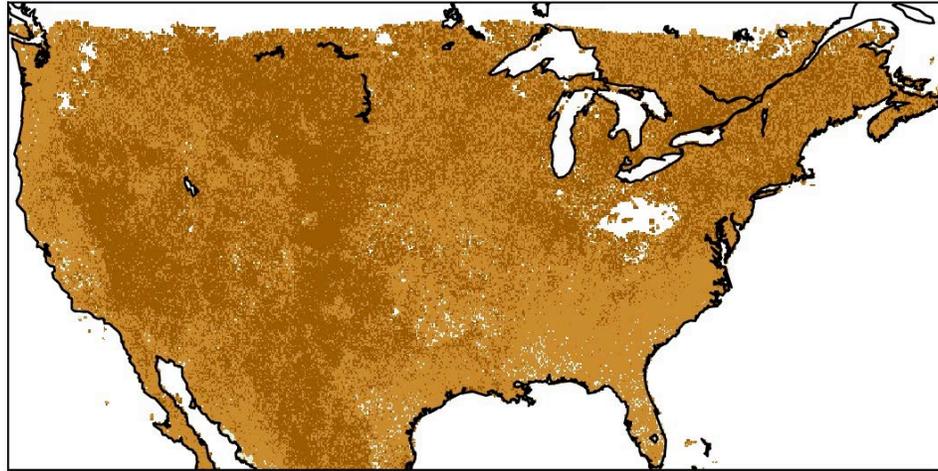


# Historia de la Evolución de la Medición de la SIF

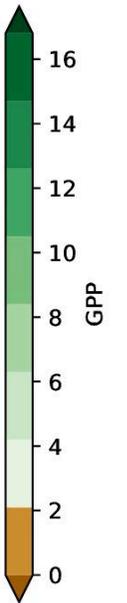
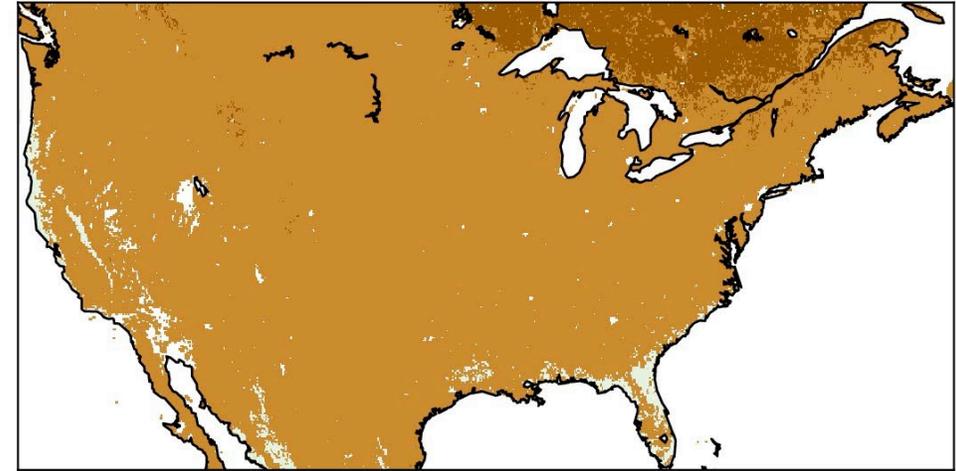
Koehler et al

TROPOMI

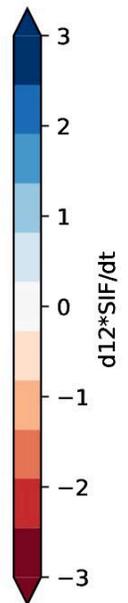
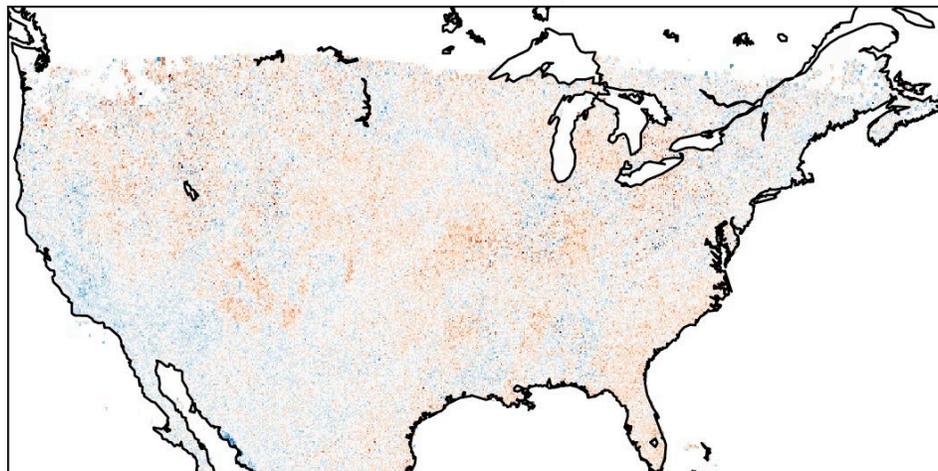
SIF 01/09/2018 - 01/17/2018



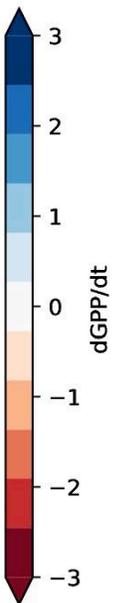
GPP 01/09/2018 - 01/17/2018



dSIF/dt 01/09/2018 - 01/17/2018



dGPP/dt 01/09/2018 - 01/17/2018

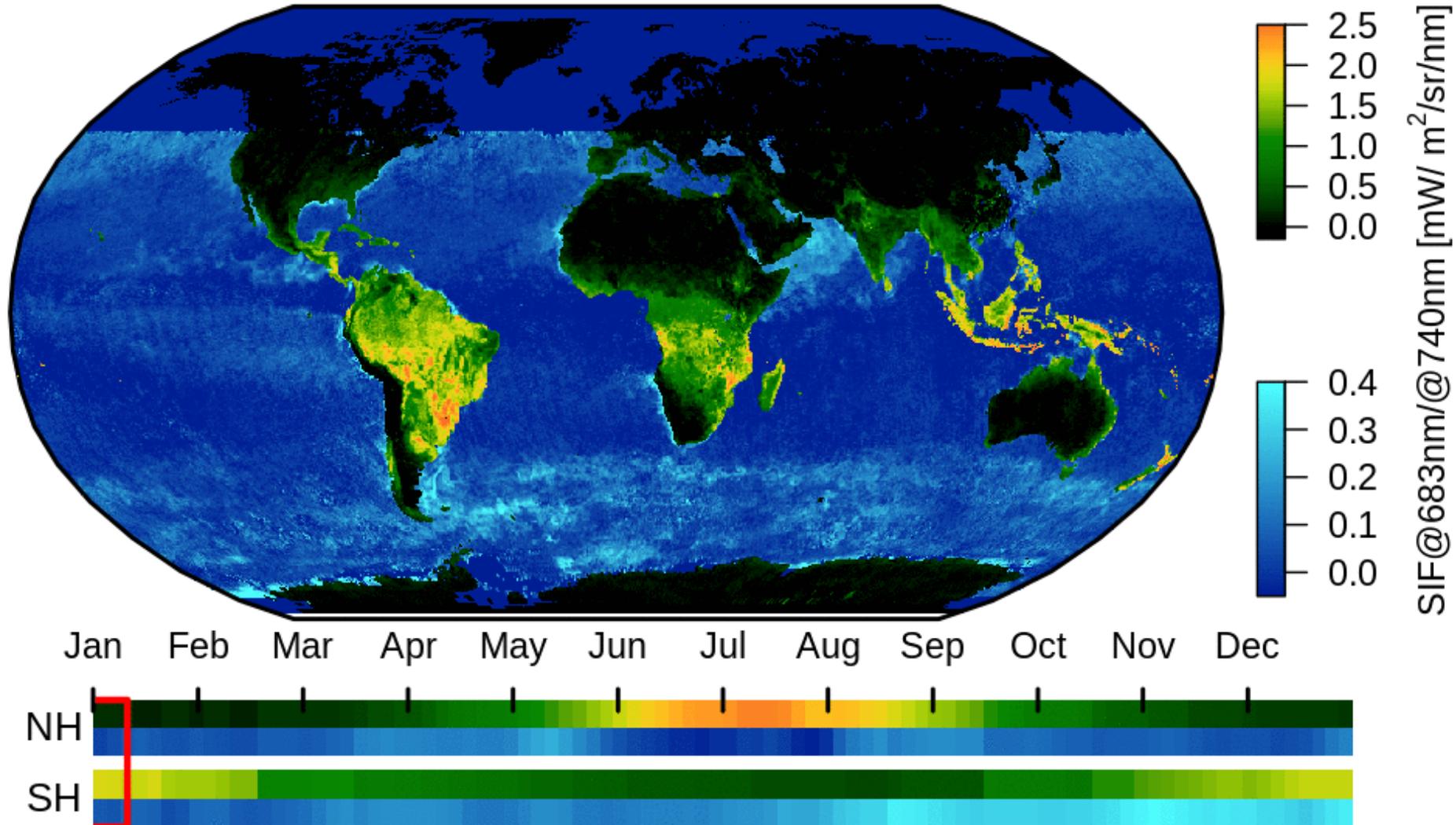


# Historia de la Evolución de la Medición de la SIF

Koehler et al

TROPOMI

2019



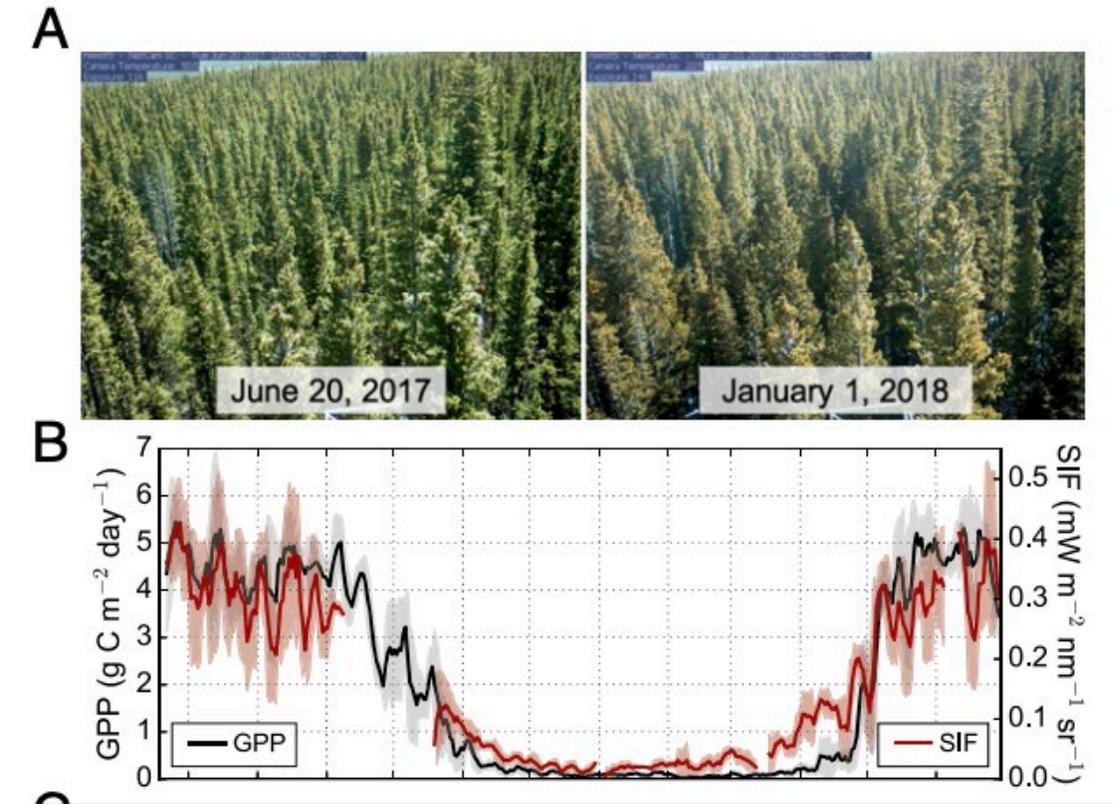
Ahora la podemos medir desde torres también! (p.ej. Árboles!)



# Mechanistic evidence for tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence

Troy S. Magney<sup>a,b,1</sup>, David R. Bowling<sup>c</sup>, Barry A. Logan<sup>d</sup>, Katja Grossmann<sup>e,2</sup>, Jochen Stutz<sup>e</sup>, Peter D. Blanken<sup>f</sup>, Sean P. Burns<sup>f,9</sup>, Rui Cheng<sup>a</sup>, Maria A. Garcia<sup>c</sup>, Philipp Köhler<sup>a</sup>, Sophia Lopez<sup>d</sup>, Nicholas C. Parazoo<sup>b</sup>, Brett Raczka<sup>c</sup>, David Schimel<sup>b</sup>, and Christian Frankenberg<sup>a,b,1</sup>

(Evidencia mecánica para el rastreo de la estacionalidad de la fotosíntesis con la fluorescencia inducida por el sol)



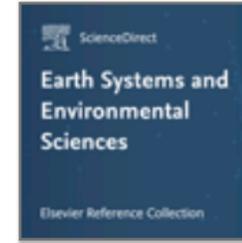
# ¿Desea saber más (información general y publicaciones de investigación)?



Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences

## Comprehensive Remote Sensing

Volume 3, 2018, Pages 143-162



### 3.10 - Solar Induced Chlorophyll Fluorescence: Origins, Relation to Photosynthesis and Retrieval

C. Frankenberg, J. Berry

Show more ▾

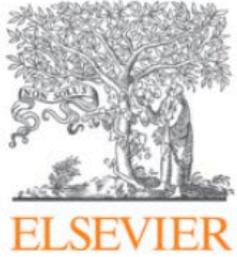
+ Add to Mendeley    Share    Cite

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10632-3>

[Get rights and content](#)



# ¿Desea saber más (información general y publicaciones de investigación)?



Remote Sensing of Environment

Volume 231, 15 September 2019, 111177



## Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress

Gina H. Mohammed <sup>a</sup>  , Roberto Colombo <sup>b</sup>, Elizabeth M. Middleton <sup>c</sup>, Uwe Rascher <sup>d</sup>, Christiaan van der Tol <sup>e</sup>, Ladislav Nedbal <sup>d</sup>, Yves Goulas <sup>f</sup>, Oscar Pérez-Priego <sup>g</sup>, Alexander Damm <sup>h, i</sup>, Michele Meroni <sup>j</sup>, Joanna Joiner <sup>c</sup>, Sergio Cogliati <sup>b</sup>, Wouter Verhoef <sup>e</sup>, Zbyněk Malenovský <sup>k</sup>, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry <sup>l</sup>, John R. Miller <sup>m</sup>, Luis Guanter <sup>n</sup>, Jose Moreno <sup>o</sup> ... Pablo J. Zarco-Tejada <sup>j, r, s, t</sup>



¿Desea saber más (información general y publicaciones de investigación)?



New Phytologist

Research review |  Open Access |  

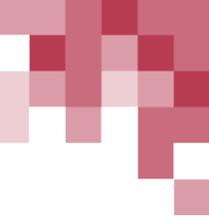
## Sun-induced Chl fluorescence and its importance for biophysical modeling of photosynthesis based on light reactions

Lianhong Gu , Jimei Han, Jeffrey D. Wood, Christine Y-Y. Chang, Ying Sun

First published: 18 March 2019 | <https://doi.org/10.1111/nph.15796> | Citations: 36



¿Desea saber más (información general y publicaciones de investigación)?



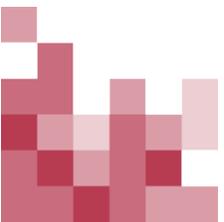
# Geophysical Research Letters

Commentary |  Free Access |

## On the Covariation of Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis Across Scales

Troy S. Magney , Mallory L. Barnes, Xi Yang

First published: 23 November 2020 | <https://doi.org/10.1029/2020GL091098>



# Limitaciones y Cautelas sobre el Uso de SIF

- Si se agregan en el tiempo y el espacio, ¡GPP y SIF muestran correlaciones lineales sorprendentemente buenas!
- SIF no mide GPP directamente, especialmente en escalas temporales breves (p.ej. el ciclo diario) o la reducción de actividad fotosintética causada por estrés, la relación lineal se puede deteriorar
- Aún tenemos mucho que aprender sobre la relación entre PSII y los rendimientos de fluorescencia
- El procesamiento de la fluorescencia no es fácil y los datos son ruidosos! Hay que tener cuidado en cuanto al ruido → ¡Tenga cuidado con la definición de  $r^2$  en la presencia de errores de precisión!
- Necesitamos entender completamente POR QUÉ funciona tan bien en escalas espaciales y temporales más bajas.
- Recuerde, SIF es principalmente un sustituto para la tasa de transporte de electrones (ya que ambos son impulsados por la luz absorbida), cómo esto sirve para secuestrar carbono es otra historia por completo ( es decir, las rutas fotosintéticas de C3 y C4 tienen una relación GPP diferente.)



# Los Próximos Pasos y Usos de SIF en el Futuro

- Hace falta investigar más sobre la relación SIF / GPP desde las hojas hasta el dosel
- La disipación sostenida no-fotoquímica y SIF necesitan ser entendidas y caracterizadas correctamente
- Combinar mediciones de SIF con otras métricas para que ya no sean necesarias las cautelas en su análisis (p.ej. a través de la medición de la transpiración, índice de reflectancia fitoquímica etc.)
- ¿Hacia ciclos diurnos desde el espacio? ¿Qué podemos aprender de SIF en escalas temporales más breves?
- ¿Usar SIF en diferentes posiciones espectrales?
- FLEX, una misión dedicada a la fluorescencia  
<https://earth.esa.int/eogateway/missions/flex>
- ¡Hay que innovar!

