



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DELLA  
TUSCIA



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO



UNIVERSITÀ  
DI PISA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA



UNIVERSITÀ  
DEL SALENTO



**Sistema per la Rilevazione e Tracciamento di ostacoli fissi e in movimento per semoventi agricole**

**BRiC INAIL 2022 ID-04**

**Simulazione del campo visivo di macchinari agricoli secondo i requisiti normativi**

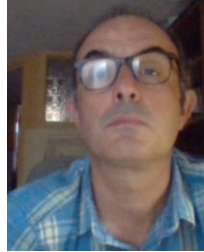
**Luca Landi., L. Burattini, Lorenzo Landi, F. Cianetti, C. Braccesi**

**Roma 07 novembre 2025**

**INAIL**

ISTITUTO NAZIONALE PER L'ASSICURAZIONE  
CONTRO GLI INFORTUNI SUL LAVORO

# Unità operativa: DI - Università di Perugia



**Prof. Ing. Luca Landi**  
(Responsabile U.O. UNIPG)  
*luca.landi@unipg.it*



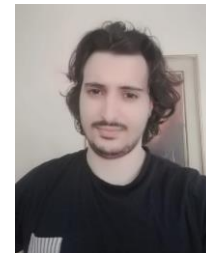
**Prof. Ing. Filippo Cianetti**  
*filippo.cianetti@unipg.it*



**Prof. Ing. Claudio Braccesi**  
*claudio.braccesi@unipg.it*



**Ing. Lorenzo Landi**  
*lorenzo.landi@collaboratori.unipg.it*



**Ing. Luca Burattini**  
*luca.burattini@dottorandi.unipg.it*

# Obiettivo specifico 4

## Obiettivo UO6:

### ↳ Definizione dei limiti di visibilità della macchina semovente.

Attività previste: *Attività 1 - Individuazione e definizione delle norme tecniche da adottare*

*Attività 2 - Rilievi sperimentali*

*Attività 3 - Modellazione basata su CAD*

***Attività 4 - Confronto del modello virtuale rispetto ai rilievi sperimentali***

*Attività 5 - Comunicazione e divulgazione dei risultati ottenuti*

*Attività aggiuntive di approfondimento*

# Obiettivo specifico 4

## Agenda

- **Definizione normative di riferimento, campo visibilità vicino e campo visibilità lontano (cenni)**
- **Macchine agricole e forestali in sperimentazione,**
- **Costruzione modello simulazione (cenni)**
- **Validazione numerica sperimentale.**
- **Altre prove di valutazione di sistemi di visione in fase di progettazione**



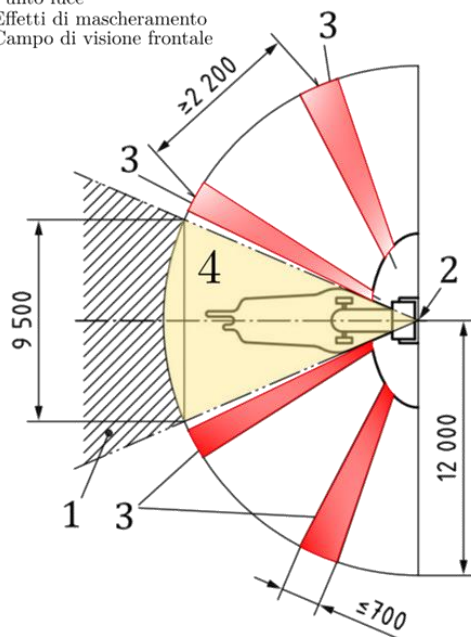
## Quadro di riferimento normativo - Analisi delle condizioni di accettabilità per il campo visivo (FoV)

### 1) Macchine agricole e forestali:

#### ISO 5721-1:2013

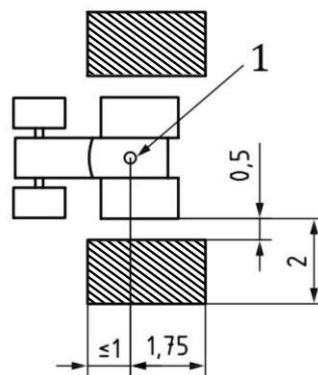
Requisiti, procedure di prova e criteri di accettazione per il campo visivo dell'operatore  
Parte 1: Campo visivo anteriore

- 1: Semicerchio di visione frontale
- 2: Punto luce
- 3: Effetti di mascheramento
- 4: Campo di visione frontale

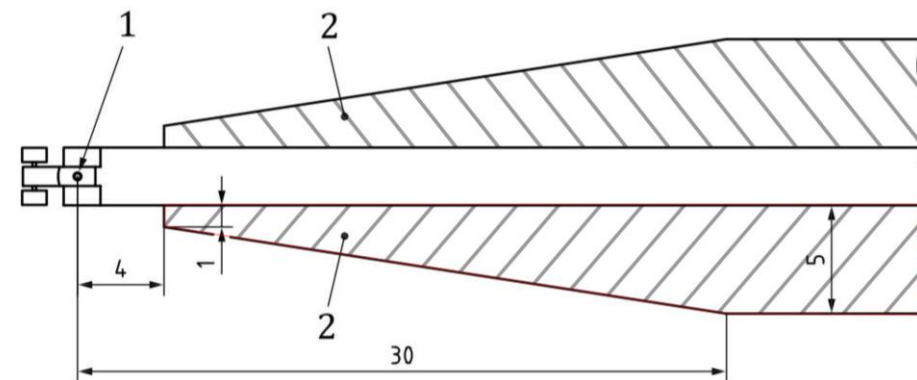


#### ISO 5721-2:2014

Requisiti, procedure di prova e criteri di accettazione per il campo visivo dell'operatore  
Parte 2: Campo visivo laterale e posteriore



1: Punto luce



1: Punto luce

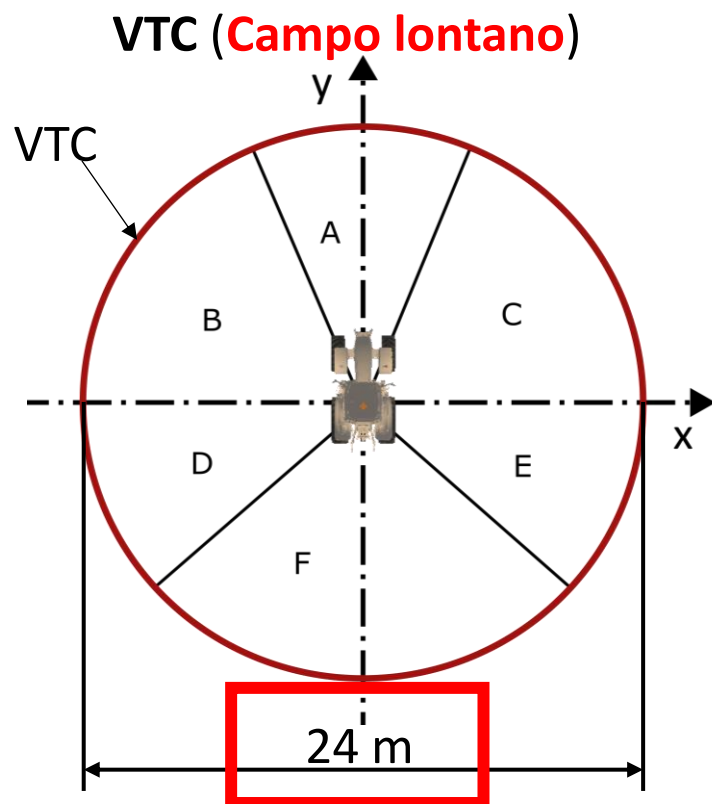
2: Campo visivo posteriore

## Quadro di riferimento normativo - Analisi delle condizioni di accettabilità per il campo visivo (FoV)

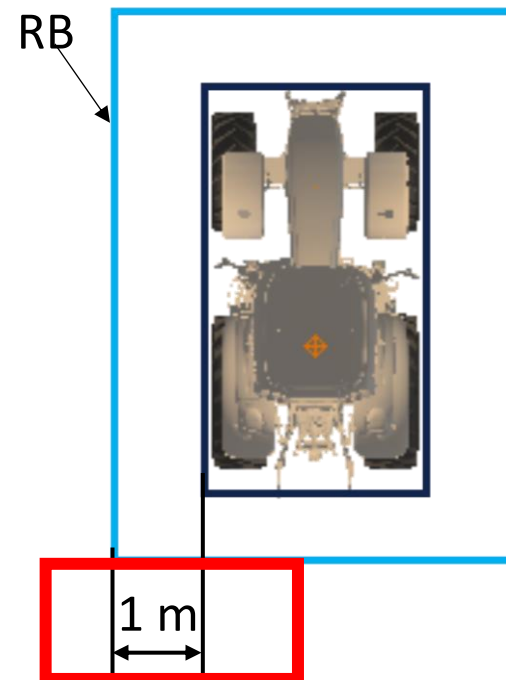
### 1) Macchine movimento terra:

ISO 5006:2017

Campo visivo dell'operatore — Metodo di prova e criteri di prestazione



**RB (Campo vicino, altezza dal suolo non definita correntemente)**

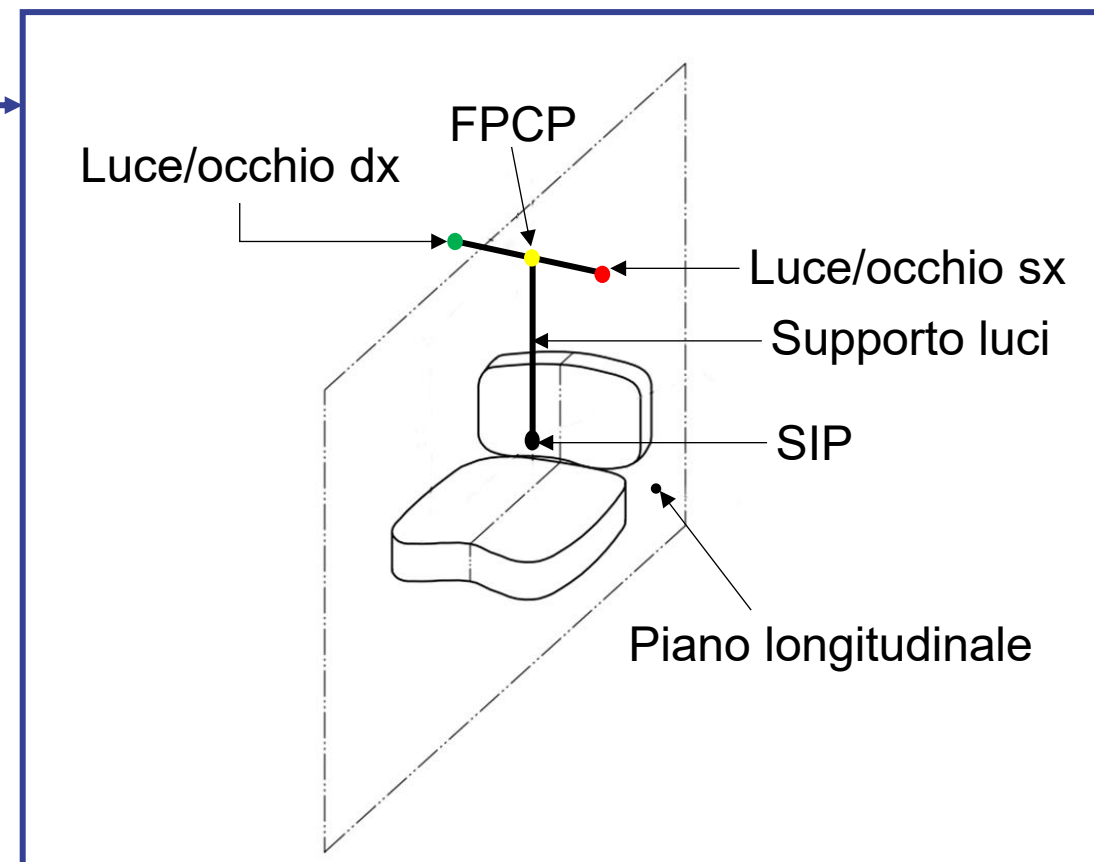
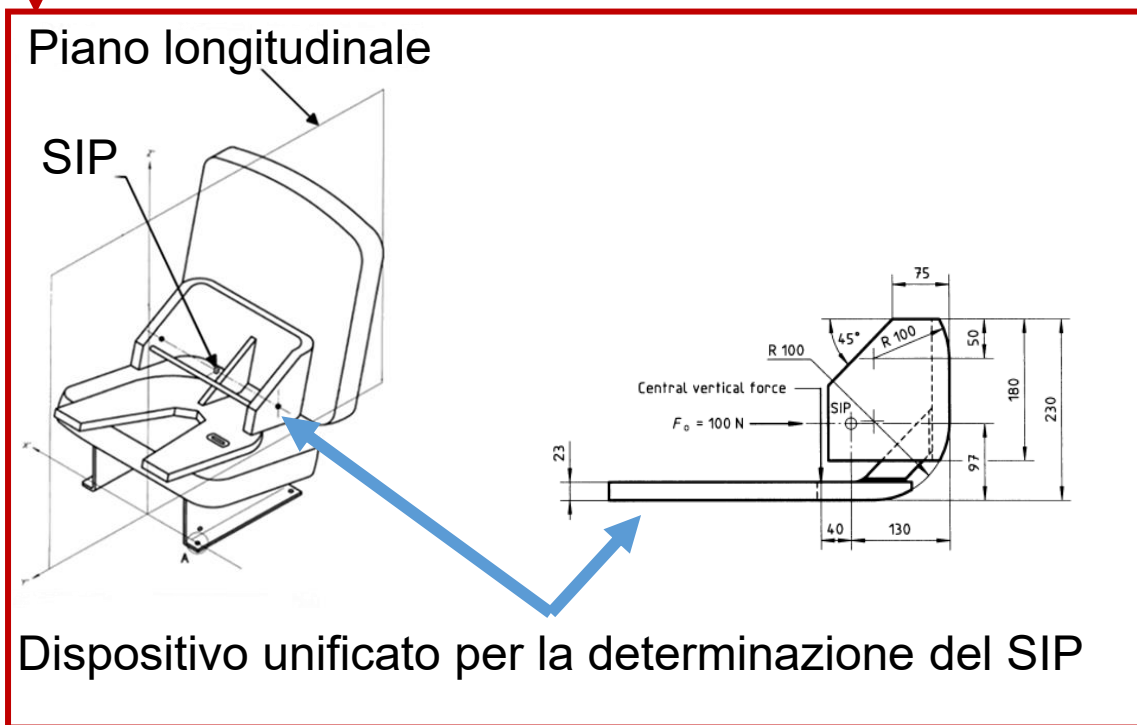


# Quadro di riferimento normativo - Analisi delle condizioni di accettabilità per il campo visivo (FoV)

ISO 5353:1998

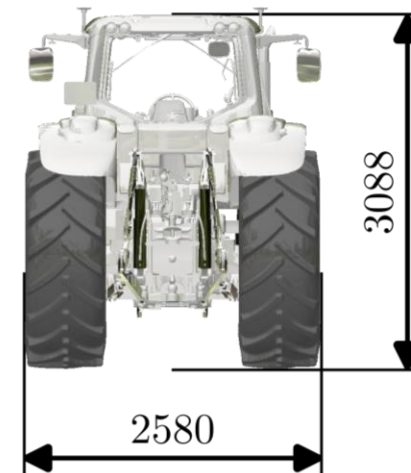
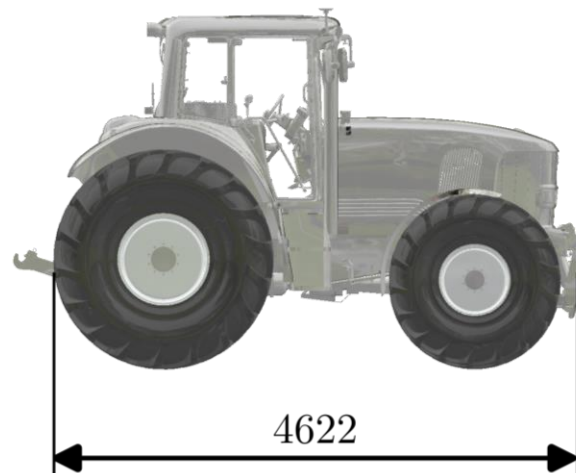
DEFINIZIONE PUNTI CARATTERISTICI

- 1) Definizione Seat index point (SIP)
- 2) Definizione punto di riferimento luci (FPCP)

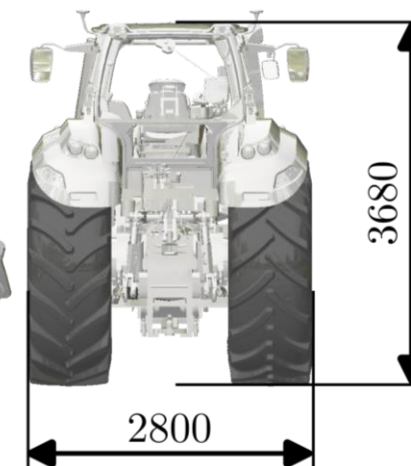
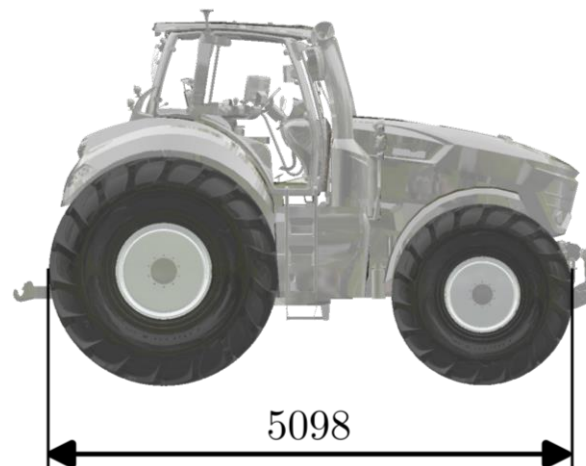


## Modelli 3D utilizzati: vasto utilizzo, presenti al Crea

John Deere 6920S



Deutz-Fahr 9340



**L'ambiente virtuale Ray-TRACING** consiste in un assembly generato in cad commerciale, nel quale si inseriscono i seguenti input:

- MODELLO TRATTORE



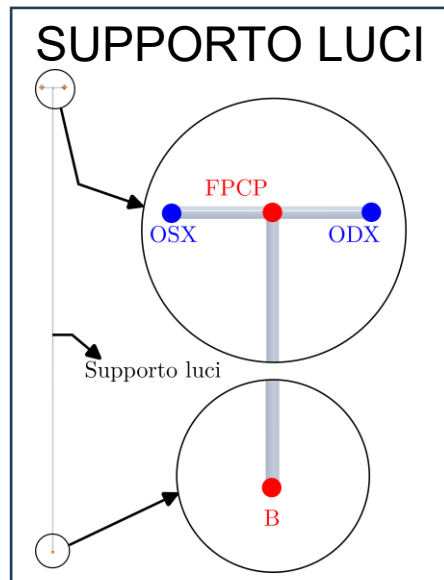
John Deere 6920S

+

- DISPOSITIVO SIP



**INPUT 1**

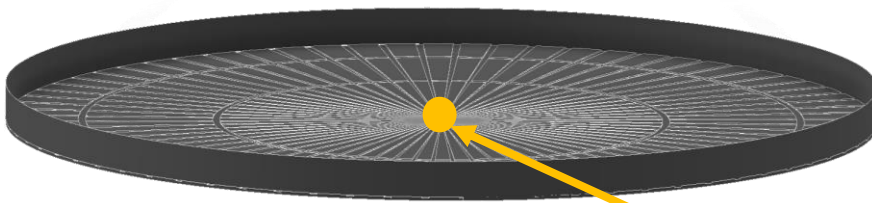


**INPUT 2**



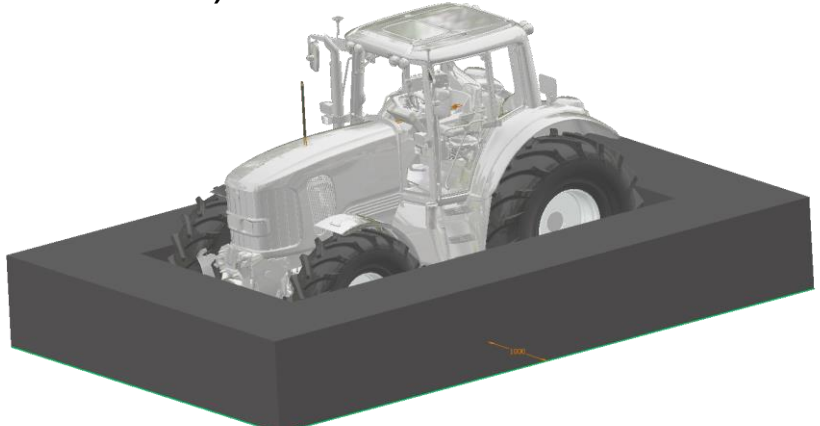
**INPUT 3**

1) CAMPO VISIVO VTC



Proiezione del punto FPCP sul campo visivo

2) CAMPO VISIVO RB



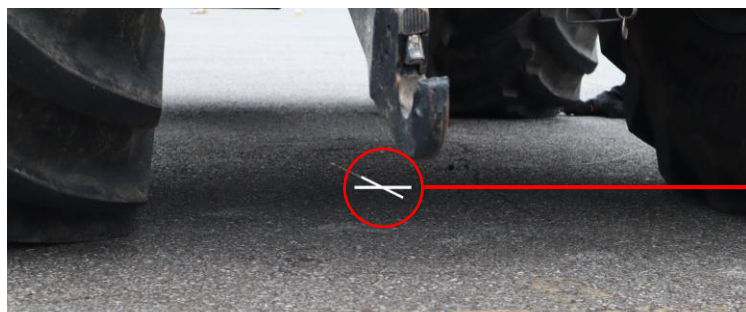
**INPUT 4**

## Prova VTC: fasi preliminari

### *Rilevazione del SIP*



### *Individuazione del centro del VTC*



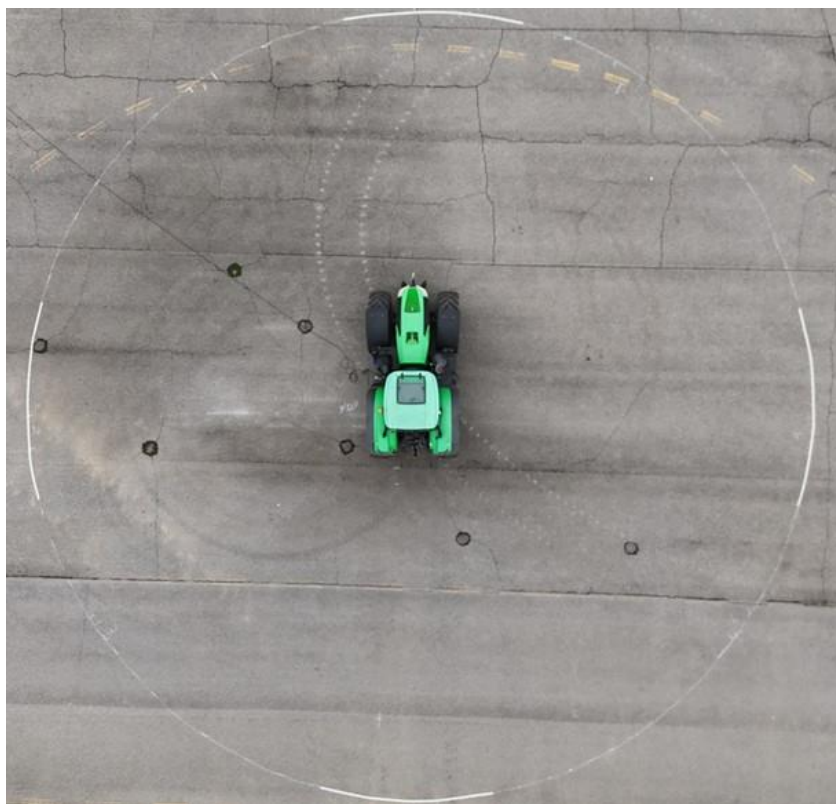
Proiezione del FPCP sul terreno

### *Installazione del supporto luci*



# Prova **diurna** VTC (campo lontano) **metodo approssimato** *Rilevazione dei mascheramenti*

*Tracciatura del VTC*



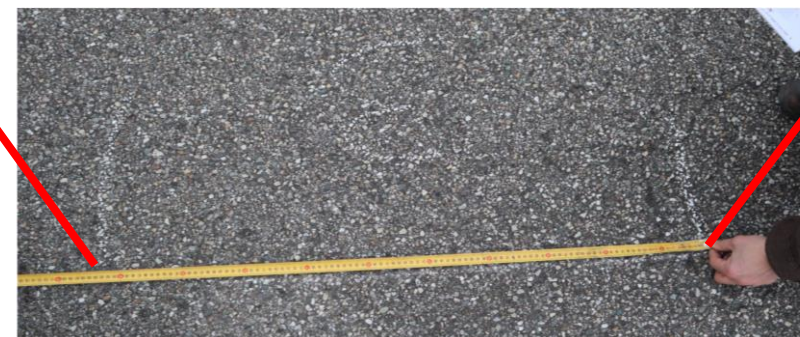
VTC ←

**Specchio** ←

*Misurazione dei mascheramenti*

Inizio mascheramento

Fine mascheramento



## Prove **notturne** campo lontano e vicino: **metodo accurato**

Per entrambe le prove sono state generate delle fotografie aeree con un drone DJI mini 4 pro:

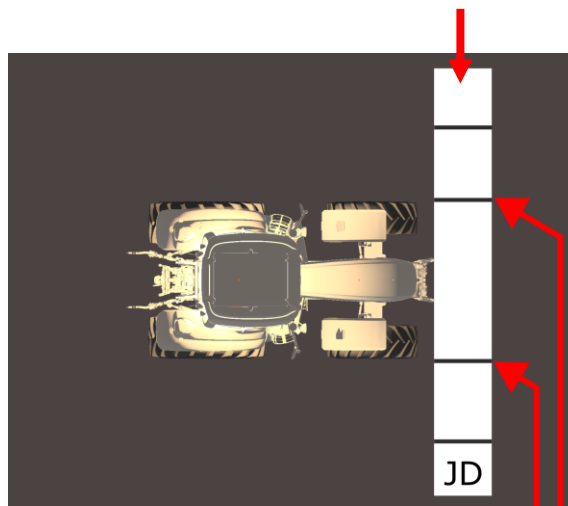
- la prova VTC utilizza la stessa configurazione impiegata nella prova con lo specchio;
- la prova **RB** richiede **l'utilizzo di un telo di riferimento e cavalletti ad altezza regolabile** (1 m e 1,5 m).



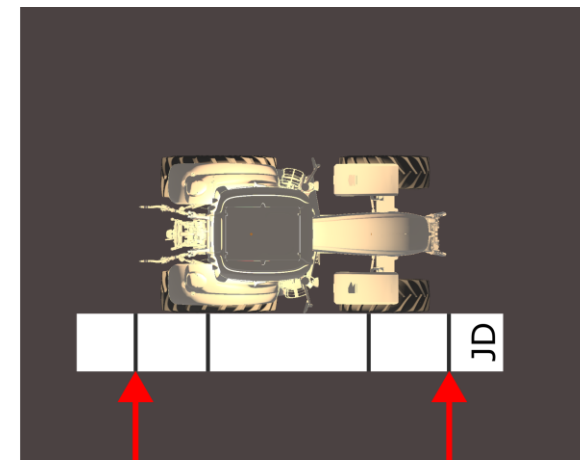
Cavalletto ad altezza regolabile

Telo di riferimento

Telo di riferimento



Segni di riferimento larghezza



Segni di riferimento lunghezza

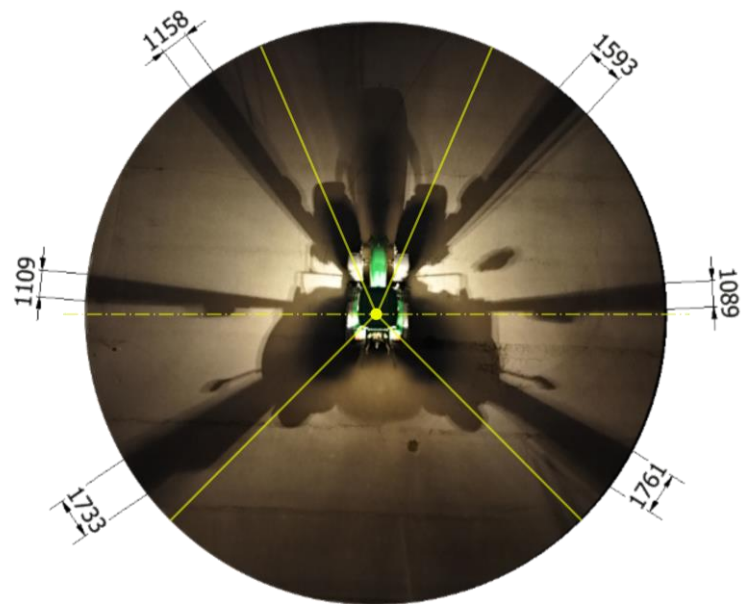
## Prove notturne VTC e RB : esecuzione della prova VTC



## Analisi dei risultati: Misura dei mascheramenti al VTC per **John Deere 6920S**

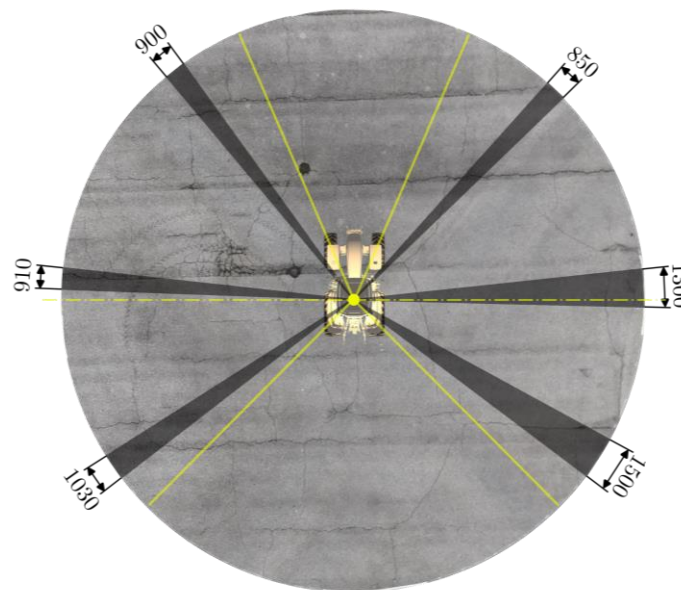
- la quotatura dei mascheramenti della prova VTC simulata e reale notturna è stata eseguita all'interno di una messa in tavola in Inventor, sovrapponendo l'immagine da esaminare alla vista base VTC, che funge da riferimento.

### VTC: Visibilità notturna



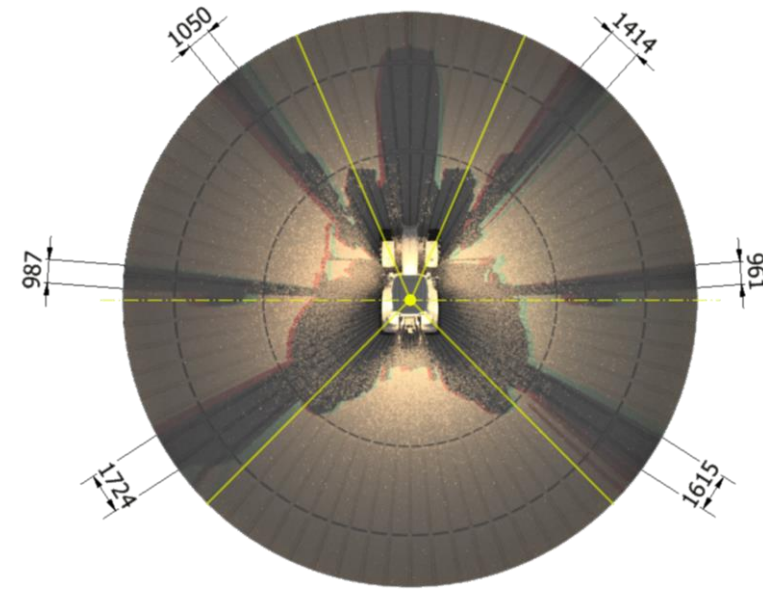
Quote espresse in mm

### Prova con specchio



Dipende molto dall'abilità dell'operatore

### Simulazione UNIPG

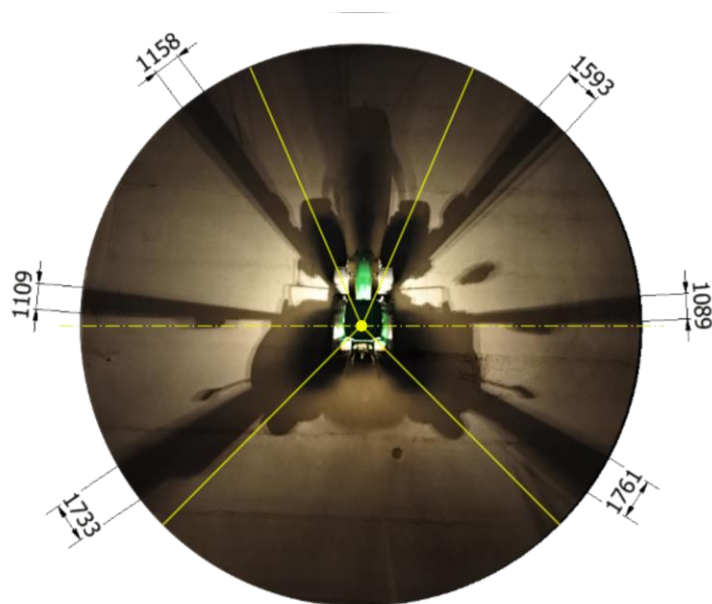


Approssima bene la prova notturna

## Analisi dei risultati: Misura dei mascheramenti al VTC per Deutz Fahr 9340

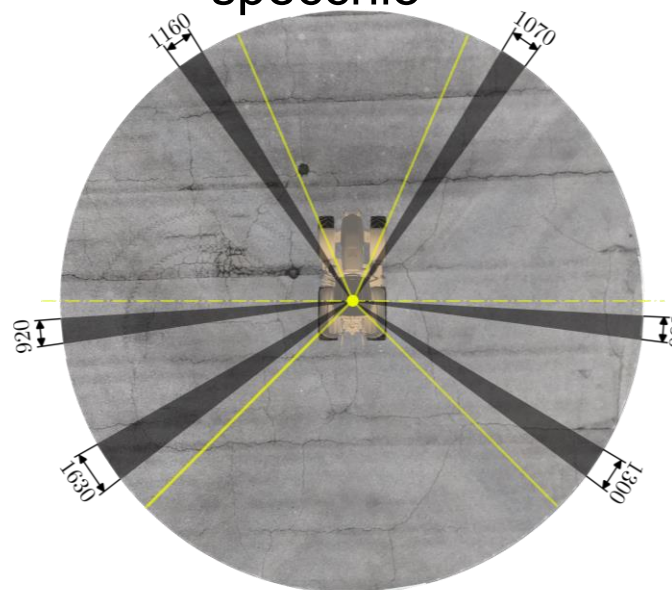
- la quotatura dei mascheramenti della prova VTC simulata e reale notturna è stata eseguita all'interno di una messa in tavola in Inventor, sovrapponendo l'immagine da esaminare alla vista base VTC, che funge da riferimento.

VTC: Visibilità notturna



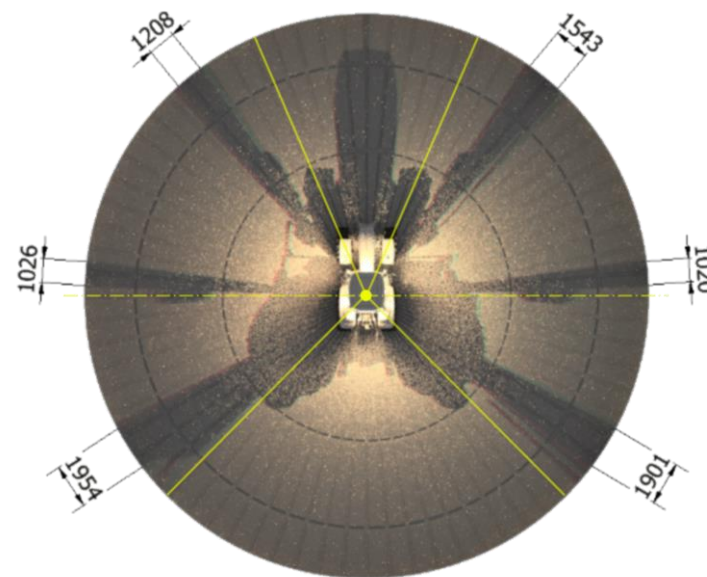
Quote espresse in mm

Prova diurna con specchio



Dipende molto dall'abilità dell'operatore

Simulazione UNIPG



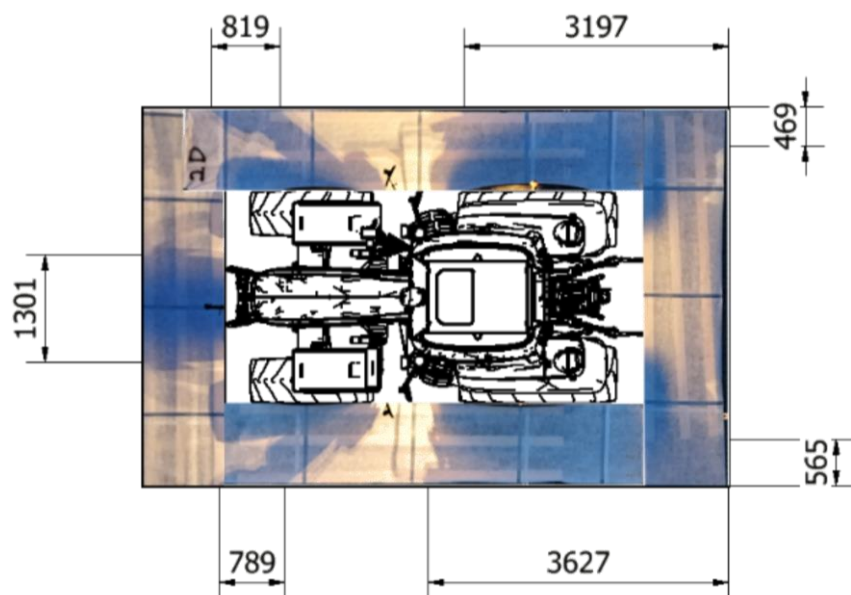
Approssima bene la prova notturna

## Analisi dei risultati: Misura dei mascheramenti al RB ad un'altezza pari ad 1m per **John Deere 6920S**

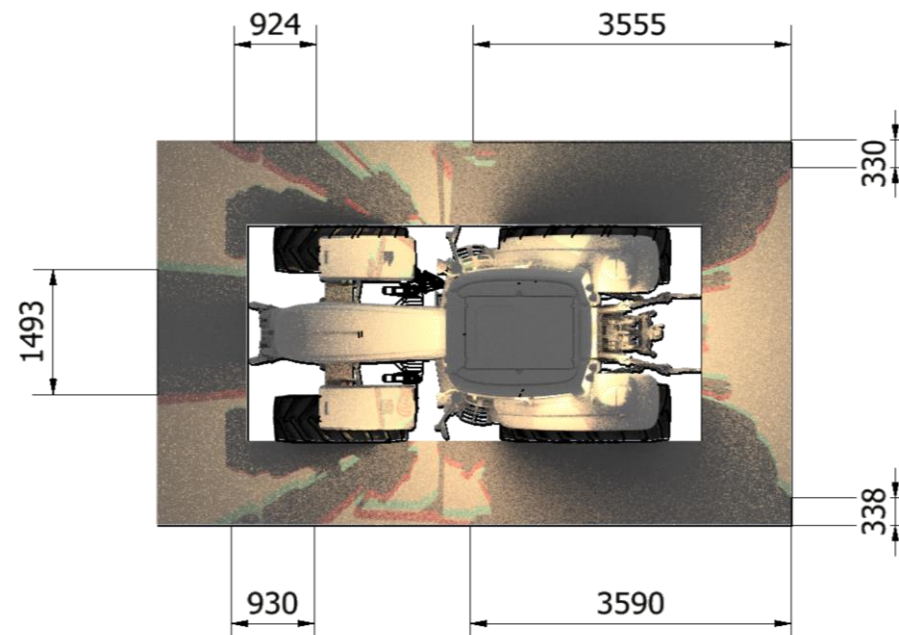
- la quotatura dei mascheramenti della prova RB simulata e reale notturna è stata eseguita all'interno di una messa in tavola in Inventor, sovrapponendo l'immagine da esaminare alla vista base RB, che funge da riferimento.

RB:

Prova reale



## Simulazione UNIPG



Buona approssimazione della prova reale, con qualche difformità dovute a difficoltà di posizionamento millimetrico del supporto luci

Quote espresse in mm

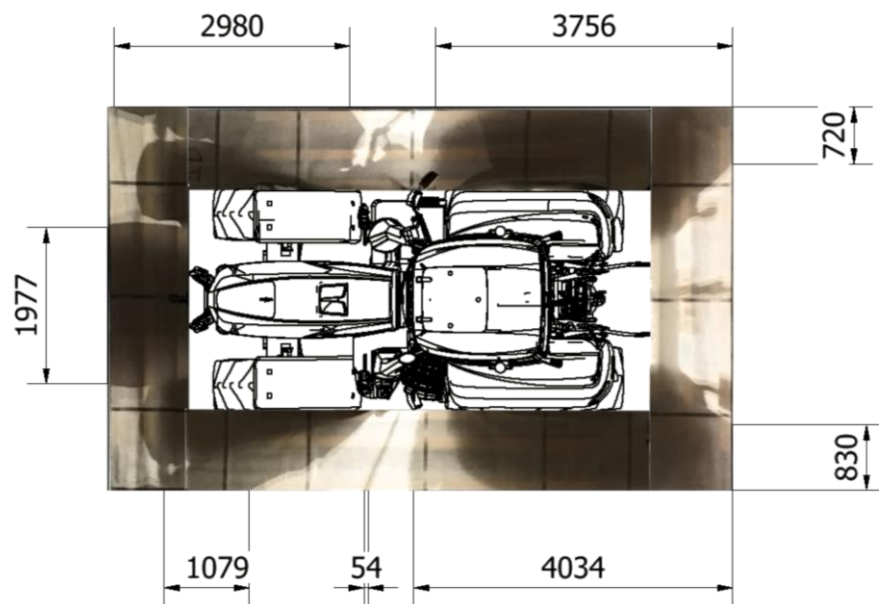
## Analisi dei risultati: Misura dei mascheramenti al RB ad un'altezza pari ad 1m per **Deutz Fahr**

### 9340

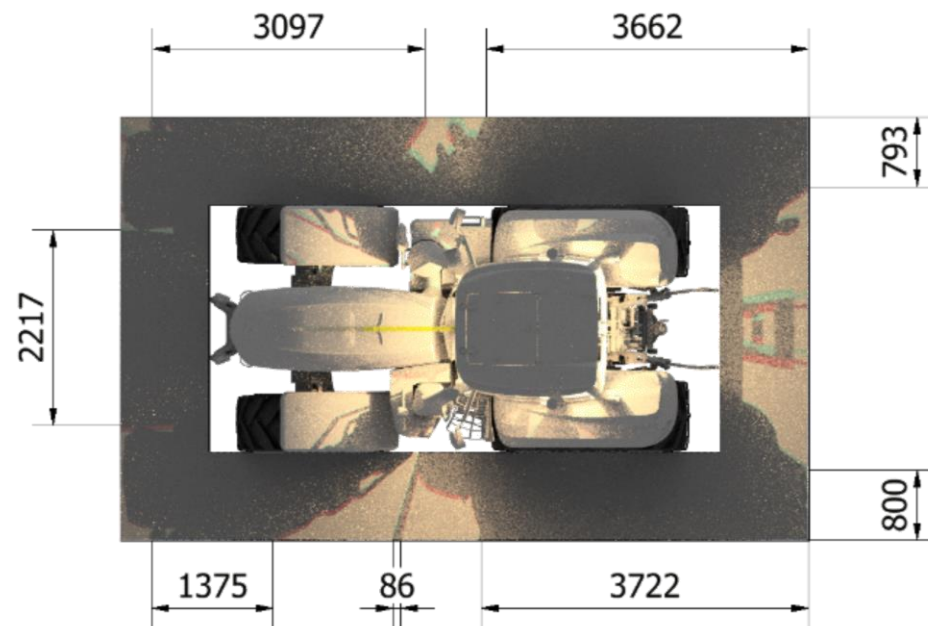
- la quotatura dei mascheramenti della prova RB simulata e reale notturna è stata eseguita all'interno di una messa in tavola in Inventor, sovrapponendo l'immagine da esaminare alla vista base RB, che funge da riferimento.

RB:

Prova reale



## Simulazione UNIPG

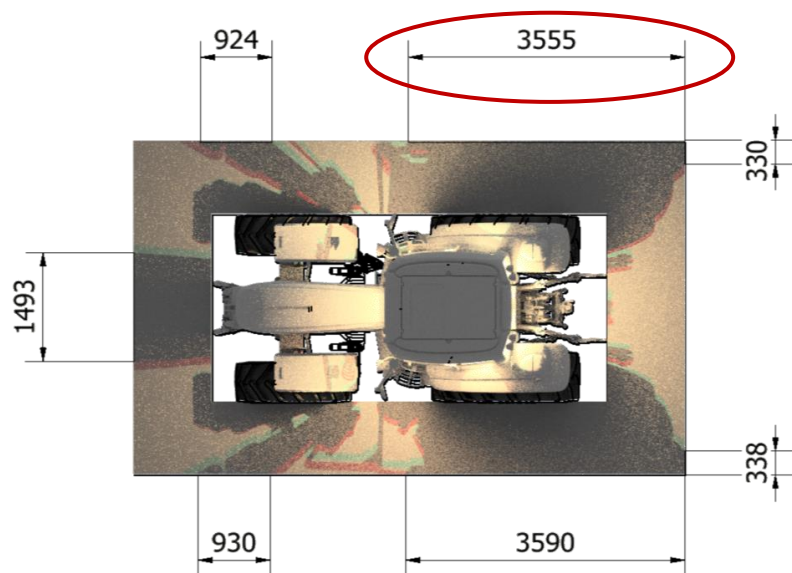


Buona approssimazione della prova reale, con qualche **difformità** dovute a difficoltà di posizionamento millimetrico del supporto luci

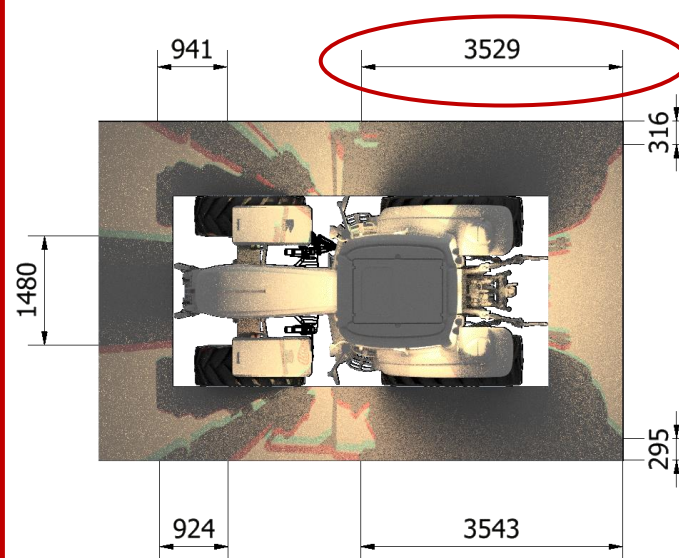
Quote espresse in mm

**Criticità riscontrate nella convalida numerico/sperimentale: misura dei mascheramenti simulati campo vicino altezza 1m per John Deere 6920S a diverse altezze del SIP:**

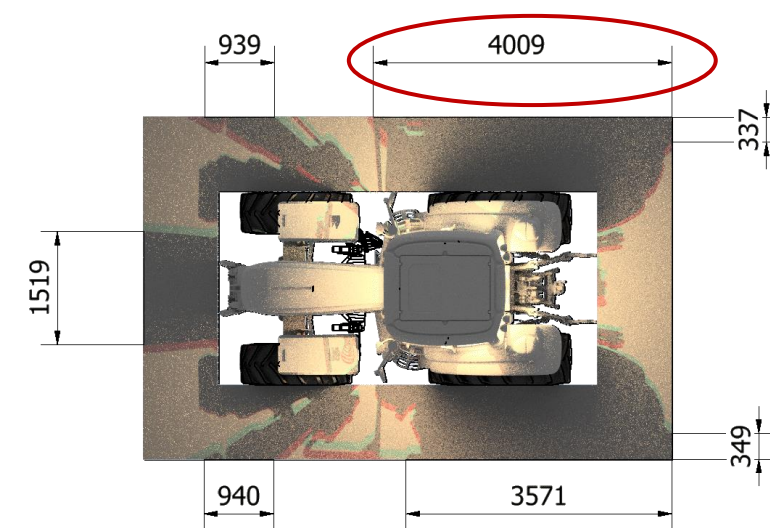
SIP ad altezza corretta



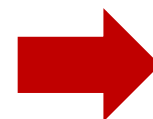
SIP alzato di 20 mm



SIP abbassato di 20 mm



**Significative variazioni** nei mascheramenti nonostante un piccolo aggiustamento dell'altezza supporto luci (**variazione max pari a 454 mm (>10%)**)



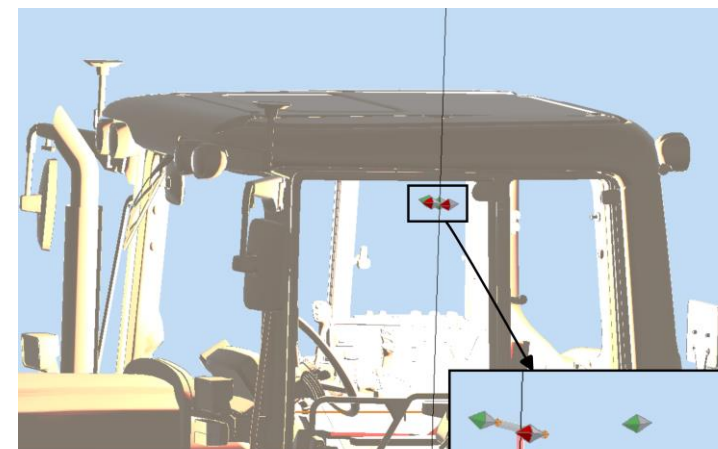
**Impossibilità** di replicare **esattamente** il **posizionamento** degli strumenti nel test standardizzato.

## Criticità riscontrate nella convalida numerico/sperimentale:

*Difformità presenti tra il modello 3D e la macchina reale:*



*Lampadine reali non puntiformi:*



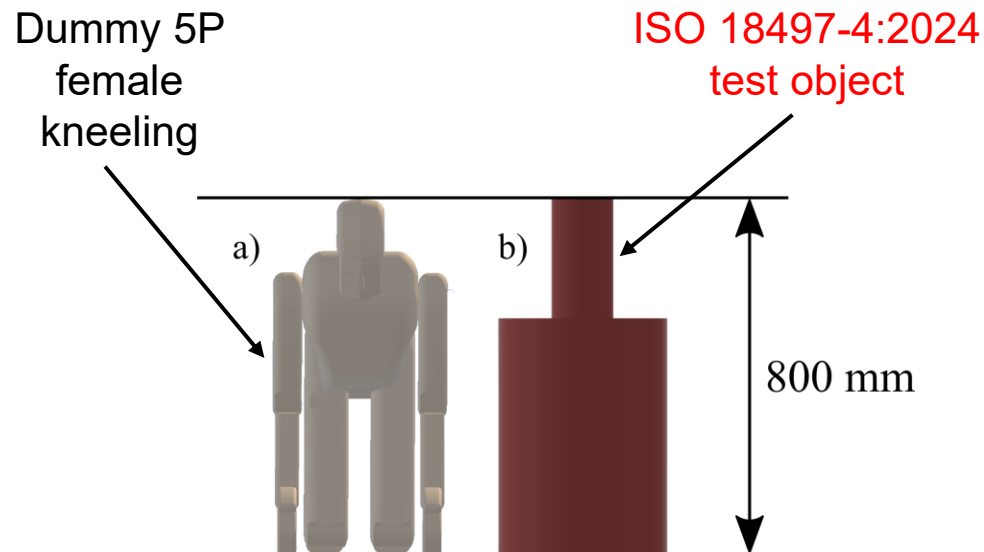
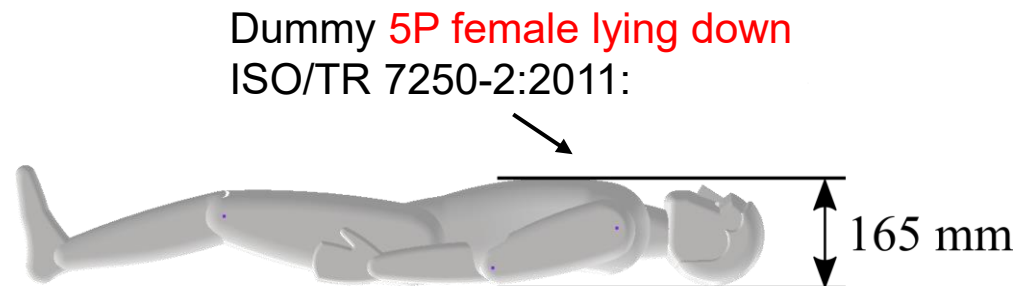
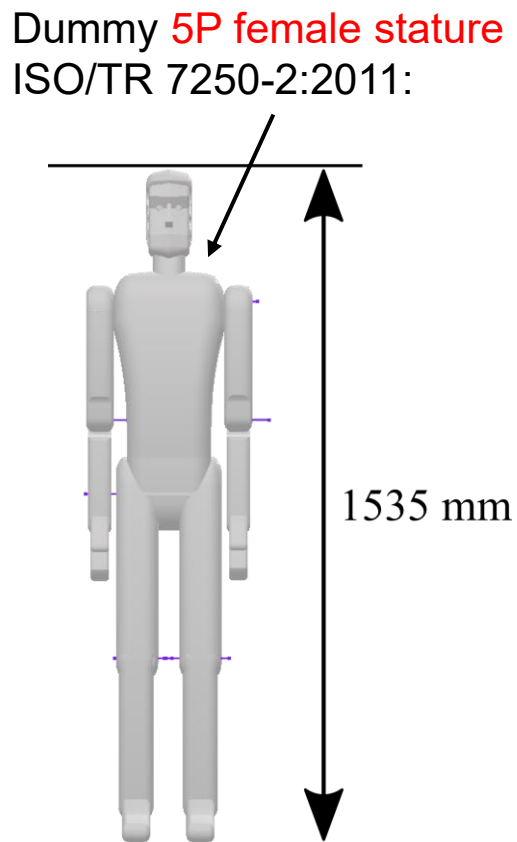
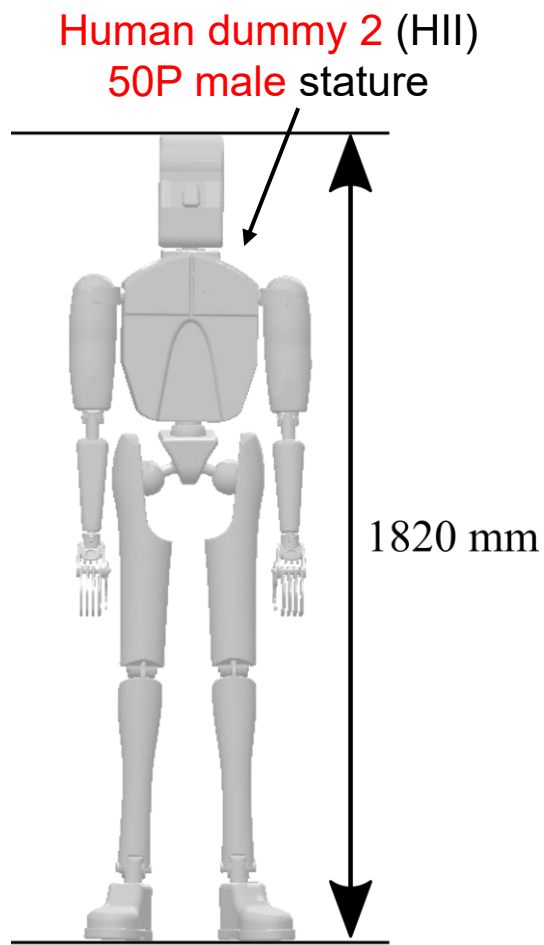
Si inseriscono 4 luci per cercare di assimilare la prova virtuale a quella reale

## Esempio di confronto reale/simulato dei mascheramenti al VTC su Deutz-Fahr 9340:

Campo di visibilità al VTC su Deutz-Fahr 9340 - confronto prova reale notturna con simulazione definitiva e prova con specchio					
	REALE	SIMULATO DEF	SPECCHIO	ERRORE SIMULATO DEF.	ERRORE SPECCHIO
MASCHERAMENTO 1	1459,0 mm	1430,0 mm	1070,0 mm	↓ 1,99%	↑ 26,66%
MASCHERAMENTO 2	1634,0 mm	1596,0 mm	850,0 mm	↓ 2,33%	↑ 47,98%
MASCHERAMENTO 3	846,0 mm	1153,0 mm	1300,0 mm	↓ 36,29%	↑ 53,66%
MASCHERAMENTO 4	863,0 mm	772,0 mm	1630,0 mm	↓ 10,54%	↑ 88,88%
MASCHERAMENTO 5	1543,0 mm	1562,0 mm	920,0 mm	↓ 1,23%	↑ 40,38%
MASCHERAMENTO 6	1224,0 mm	1233,0 mm	1160,0 mm	↓ 0,74%	↑ 5,23%

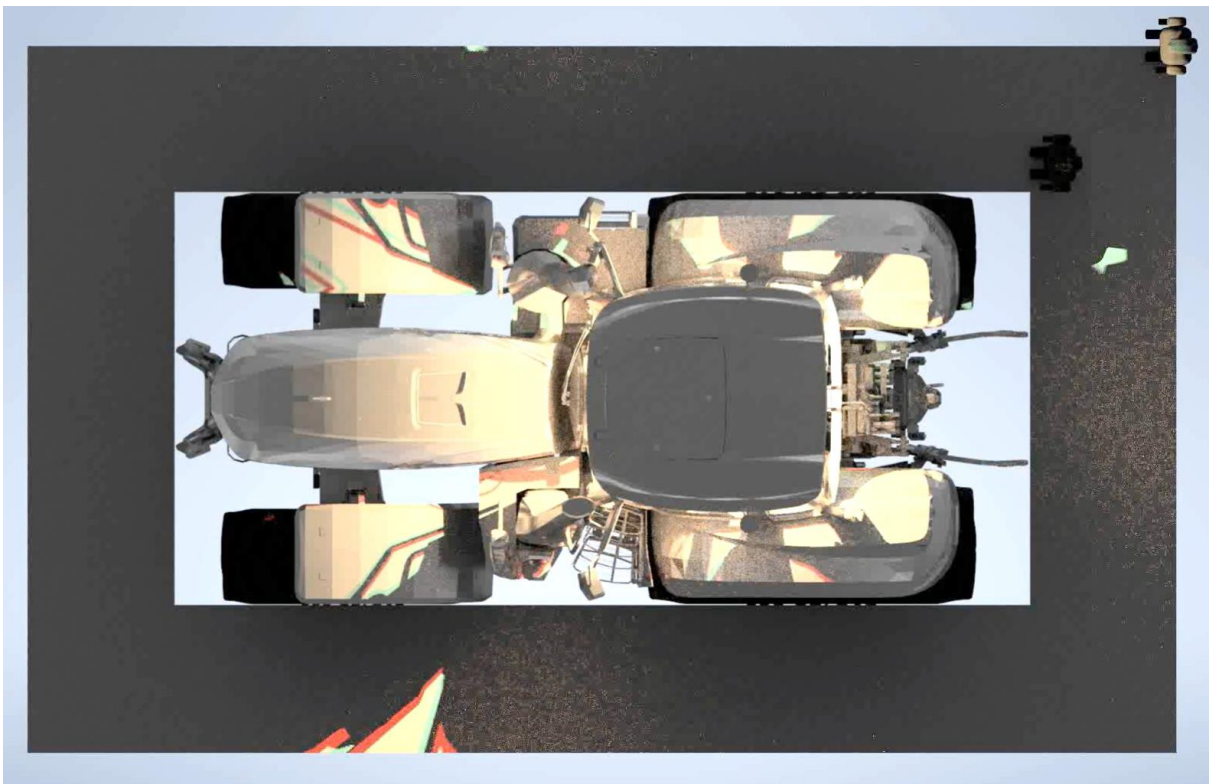
La prova con lo specchio genera, per ogni mascheramento, un errore nettamente superiore

# Prove NON standardizzate e criticità del campo vicino al trattore: dummies usati

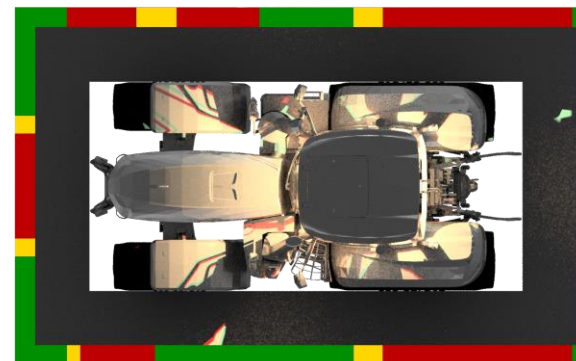


## Prove aggiuntive e criticità del campo vicino al trattore: **risultati rendering animato**

Dummy 5° percentile **femmina in piedi**:

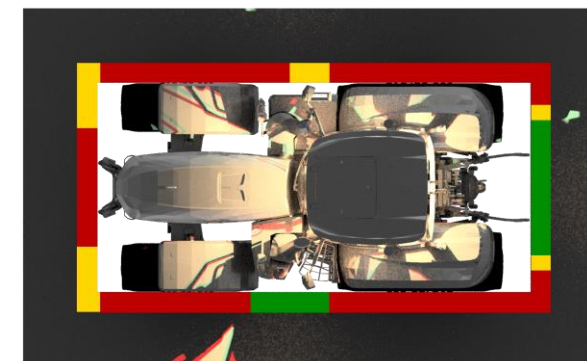


Tangente esterno RB



■ : 54%  
 ■ : 38%  
 ■ : 8%

Tangente ingombro trattore



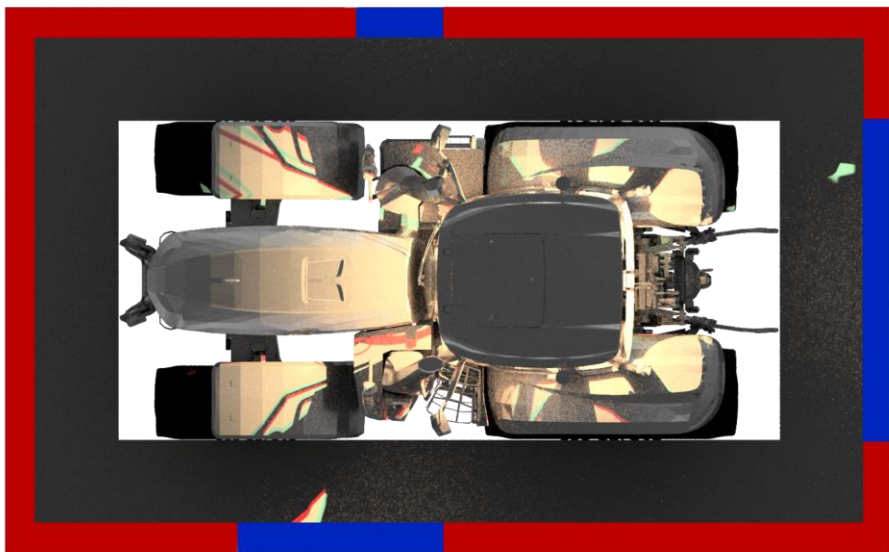
■ : 68%  
 ■ : 17%  
 ■ : 15%

Metrica usata:

- Rosso: Area in cui il manichino è completamente invisibile.
- Giallo: Area in cui è visibile solo la testa.
- Verde: Area in cui sono visibili la testa e almeno un altro arto.

## Prove aggiuntive e criticità del campo vicino al trattore: risultati rendering animato

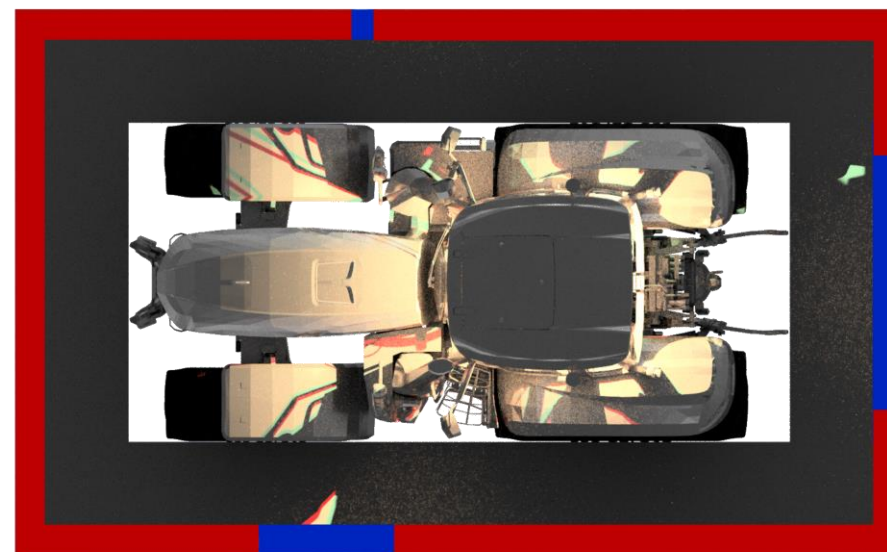
Dummy 5° percentile **femmina inginocchiata:**



■: 63%

■: 37%

Dummy 5° percentile **femmina sdraiata:**



■: 70%

■: 30%

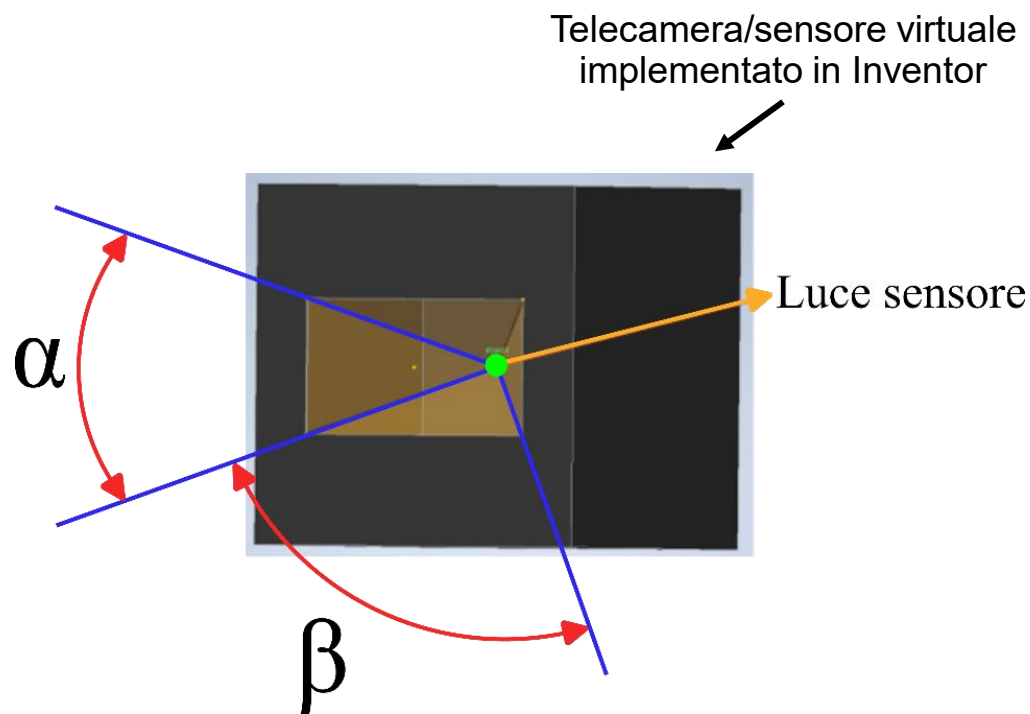
Legenda:

■ Rosso: Area in cui il manichino è completamente invisibile.

■ Blu: Area in cui è visibile almeno un altro arto.

## Sviluppo telecamere/sensori virtuali ottimizzazione sistemi visione indiretta in progettazione

Implementazione virtuale telecamera/sensore con angoli di apertura verticale ( $\alpha$ ) e orizzontale ( $\beta$ ) regolabili in maniera parametrica:



Parametri

Digita parola chiave...

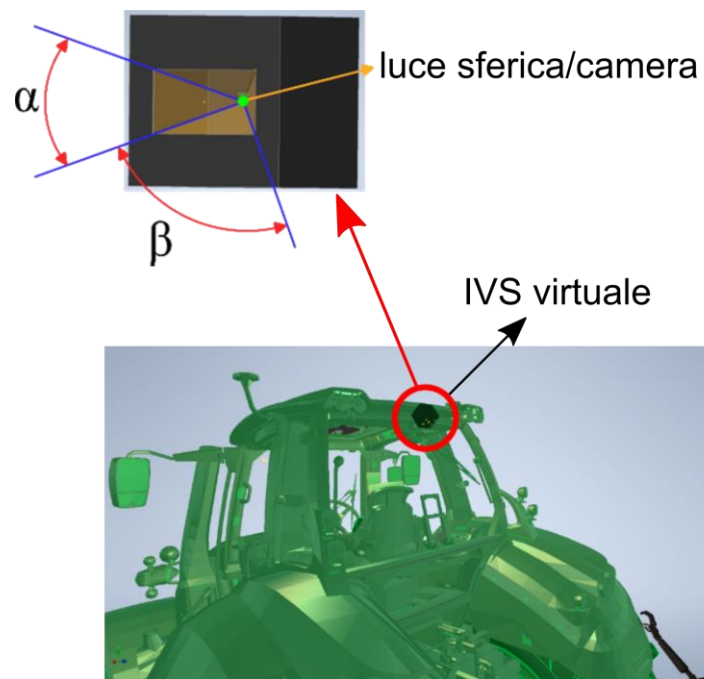
Nome parametro	Incorpor.	Unità/tip	Equazione	Valore nominal	Tolleranz	Valore modello	Chiave	Esp	Commento
+ Parametri modello									
- Parametri utente									
dist_luce	altezza...	mm	50 mm	50,000000	●	50,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
altezza_scato	d13, d2	mm	101 mm	101,000000	●	101,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
larghezza_scato	d14, d0	mm	101 mm	101,000000	●	101,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
alfa	larghez...	gr	69 gr	69,000000	●	69,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
beta	altezza...	gr	42 gr	42,000000	●	42,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Collegamento
  Aggiornamento immediato

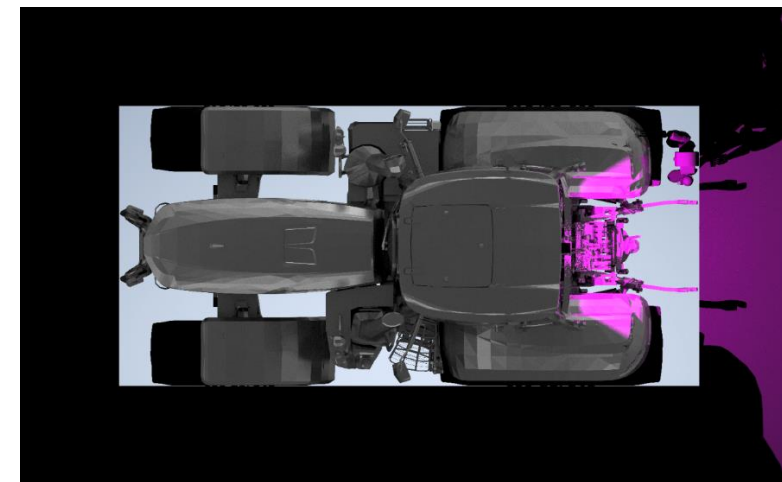
## Prove aggiuntive: virtualizzazione di operazioni manutentive

I **sistemi di visione indiretta (IVS)** ottimizzati in progettazione mediante:

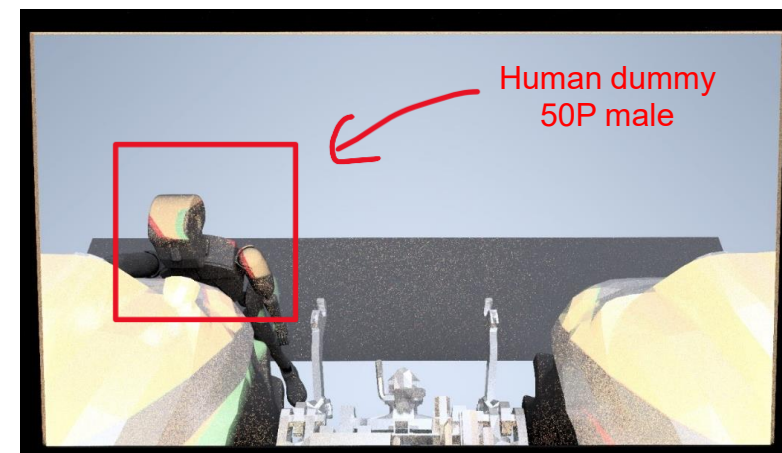
- L'analisi dell'aumento della porzione illuminata.
- L'osservazione diretta dell'inquadratura prodotta dalla telecamera.



a)



b)



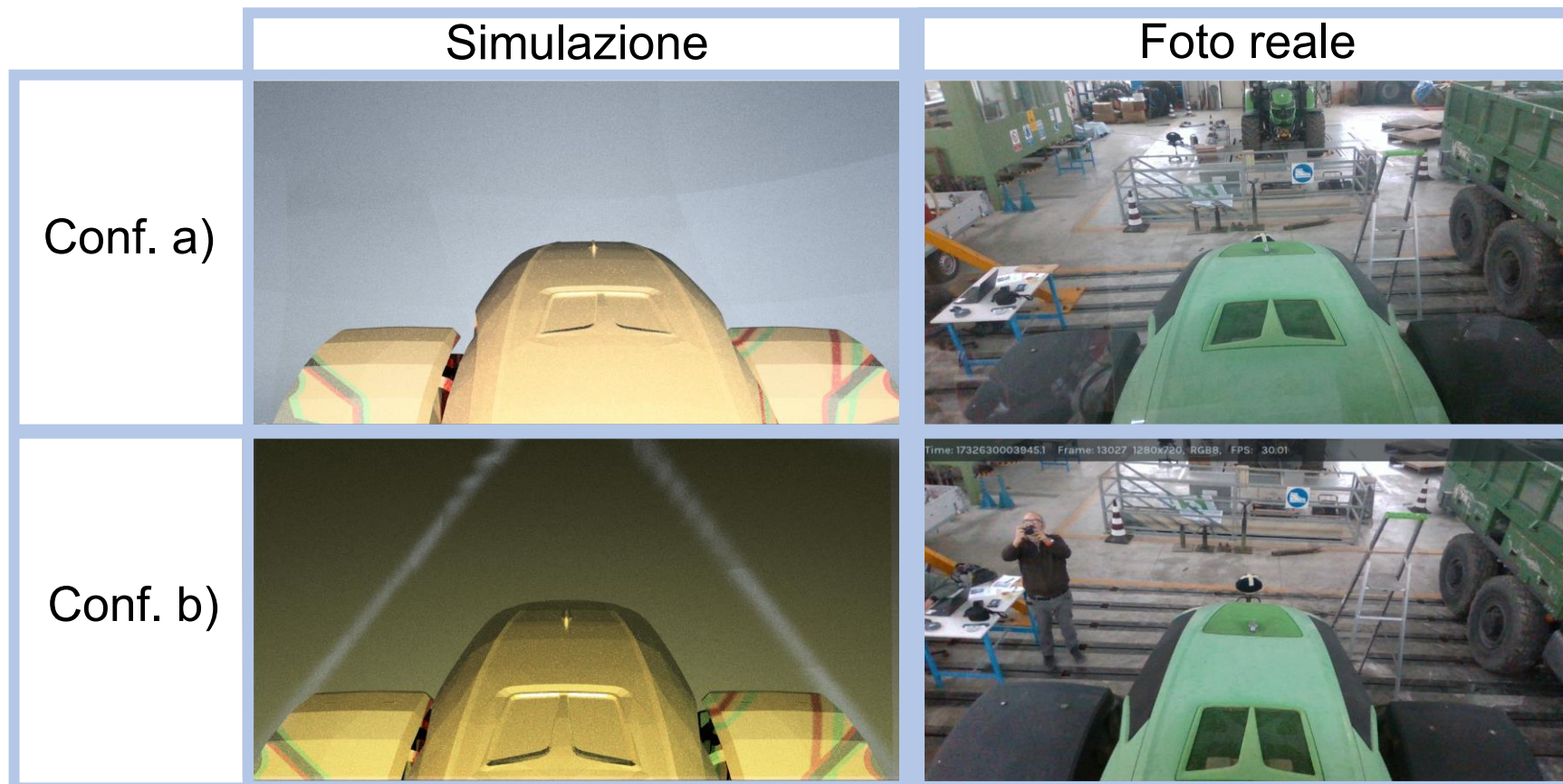
# Prove aggiuntive: validazione numerico/sperimentale telecamere virtuali

Simulazione telecamera Intel RealSense D435i



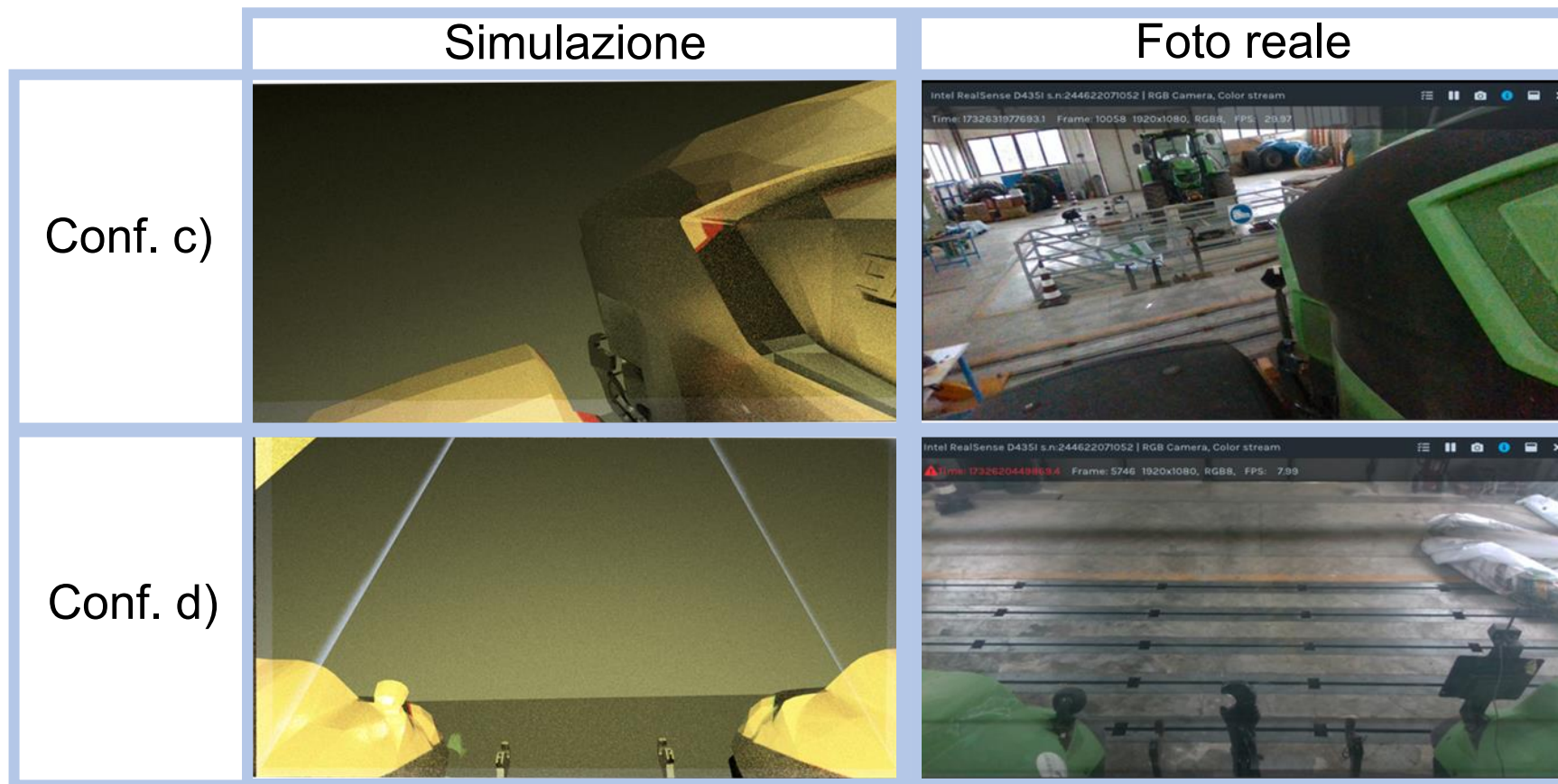
## Prove aggiuntive: **validazione numerico/sperimentale telecamere virtuali**

Simulazione telecamera Intel RealSense D435i



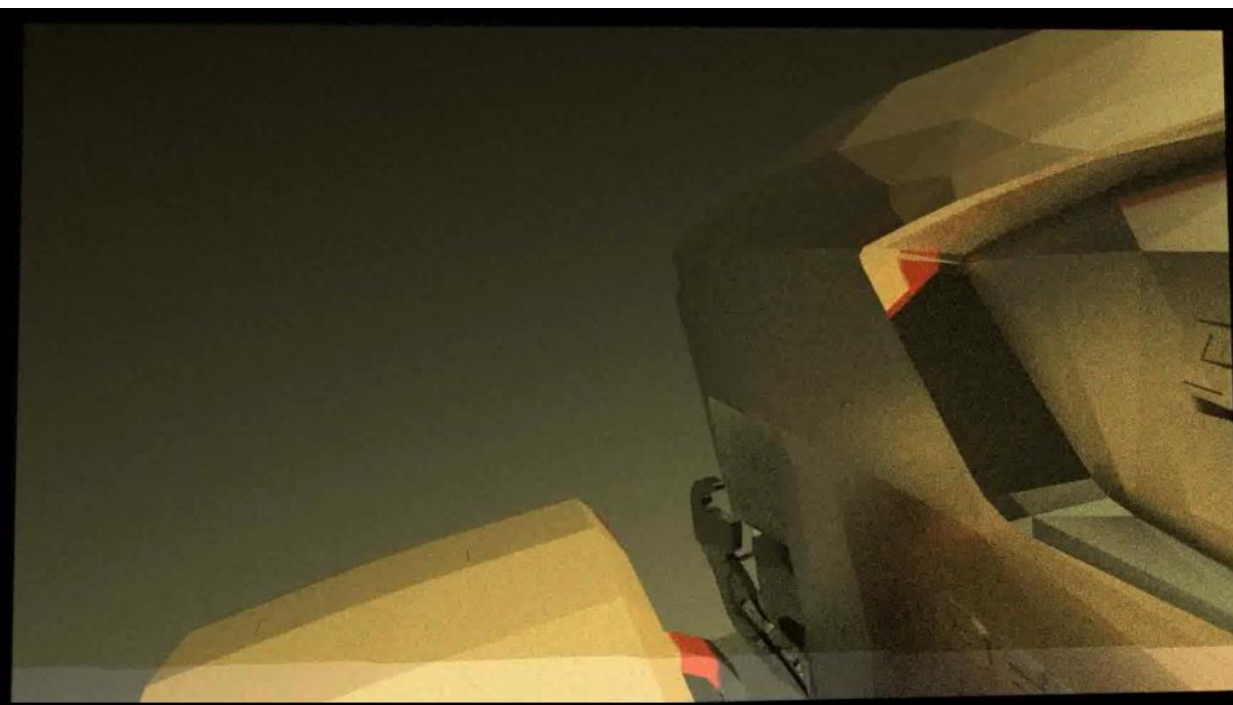
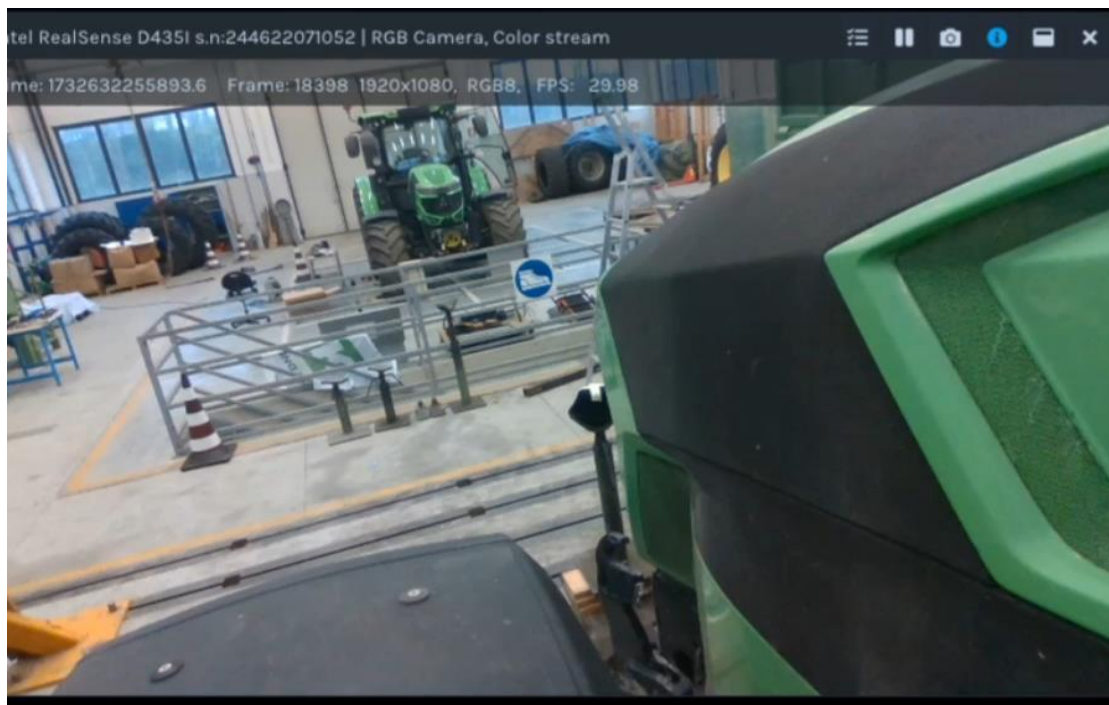
## Prove aggiuntive: validazione numerico/sperimentale telecamere virtuali

Simulazione telecamera Intel RealSense D435i



## Prove aggiuntive: validazione numerico/sperimentale telecamere virtuali

Simulazione telecamera Intel RealSense D435i



In relazione all'attività 4.5, sono state svolte le seguenti **azioni di disseminazione:**

- Publicazione di un articolo dal titolo "Ray-Tracing Method for Fields of View Simulation in Agricultural and Forestry Vehicles" su Journal of Agricultural Engineering (JAE).
- International conference on Safety & Innovation, 11-13 marzo 2025, Roma (Italia)
- ESREL 2025 – European Safety and Reliability Conference, 15-19 giugno 2025, Stavanger (Norvegia).



## conclusioni

- Sistemi di validazione virtuali possono essere **efficacemente usati in fase di progettazione** con risultati comparabili alle tecniche di test reali standardizzate,
- **Non necessitano di strumenti particolarmente complessi** (cad+render+assembly di prova), **tempi di rendering sotto 3 min**
- **Utilissimi per validare le fonti di errore** su prove standardizzate
- **Utilissimi per ottimizzare posizionamento IVS in progettazione**

