



MÀSTER UNIVERSITARI EN OPTOMETRIA I CIÈNCIES DE LA VISIÓ

TREBALL FINAL DE MÀSTER

MESURA DE DIFERÈNCIES DE COLOR EN SUPERFÍCIES AMB PATRONS ESPACIALMENT COMPLEXOS UTILITZANT UN SIS- TEMA HIPERESPECTRAL

XANA DELPUEYO ESPAÑOL

MERITXELL VILASECA RICART
JAUME PUJOL RAMO
DEPARTAMENT D'ÒPTICA I OPTOMETRIA



MÀSTER UNIVERSITARI EN OPTOMETRIA I CIÈNCIES DE LA VISIÓ

La Dra. MERITXELL VILASECA RICART i el Dr. JAUME PUJOL RAMO,
com a directors del treball

CERTIFIQUEN

Que la Sra. XANA DELPUEYO ESPAÑOL ha realitzat sota la seva supervisió el treball MESURES DE DIFERÈNCIES DE COLOR EN SUPERFÍCIES AMB PATRONS ESPACIALMENT COMPLEXOS UTILITZANT UN SISTEMA HIPERESPECTRAL que es recull en aquesta memòria per optar al títol de màster en optometria i ciències de la visió.

I per a què consti, signen aquest certificat.

Dra Meritxell Vilaseca Ricart
Directora del treball

Dr. Jaume Pujol Ramo
Director del treball

Terrassa, 14 de Juny de 2013



MÀSTER UNIVERSITARI EN OPTOMETRIA I CIÈNCIES DE LA VISIÓ

MESURA DE DIFERÈNCIES DE COLOR EN SUPERFÍCIES AMB PATRONS ESPACIALMENT COMPLEXOS UTILITZANT UN SISTEMA HIPERESPECTRAL

RESUM

Un sistema hiperespectral permet la captura d'imatges en una gran quantitat de bandes espectrals, de manera que es pot obtenir informació espectral i colorimètrica precisa de l'escena captada amb una elevada resolució espacial. Això representa una avantatge fonamental respecte a sistemes convencionals de mesura com els espectrofotòmetres i els colorímetres, els quals integren la informació en una regió relativament gran i presenten una resolució espacial molt limitada. Com a conseqüència s'han generat grans expectatives pel què fa a la utilització de sistemes hiperespectrals en l'avaluació de les propietats espectrals i de color, sobretot de mostres amb patrons espacialment complexos. Tot això pot aportar avantatges en l'automatització de processos de producció industrial de productes.

Per aquest motiu l'objectiu principal d'aquest treball és la posada a punt d'un sistema hiperespectral per a la posterior mesura de propietats colorimètriques i espectrals d'objectes. El sistema està format principalment per una càmera digital acoblada a un espectrògraf i un objectiu. En aquest treball s'ha portat a terme el calibratge espectral i radiomètric del sistema, comprovant-ne la seva repetibilitat i reproductibilitat. Els resultats mostren la seva potencialitat per a la mesura de les propietats espectrals i colorimètriques de mostres tant uniformes com amb patrons espacialment complexos.

AGRAÏMENTS

Voldria agrair al Jaume Pujol i a la Meritxell Vilaseca per permetre'm realitzar aquest treball i per ajudar-me i guiar-me durant aquests mesos.

Als meus pares per tot el suport que m'han donat, i el que em donaran.

A la meva colla per aguantar-me a les nits del cap de setmana (Aitor, Desi, Jordi, Juanjo i en especial a Vero per les nostres converses en aquests petits trajectes en cotxe).

Al meu company de laboratori Jorge per ajudar-me en tot el que ha pogut i més, al meu company de taula Carles per tot el seu suport i en Tapani, de la universitat Joensuu (Finlàndia) per ensenyar-me tantes coses desinteressadament.

A tots els companys de classe per aguantar-me cada dia, per a totes les hores que hem passat junts i aquests sopar inoblidables.

Al CD6 per fer-me sentir com a casa des del primer dia.

I a totes aquelles persones que tot i no ser mencionades m'han ajudat i m'han donat suport en aquests últims mesos.

Moltes gràcies !!

ÍNDIX

1.	INTRODUCCIÓ.....	6
2.	ESTAT DE L'ART.....	8
2.1.	Sistemes hiperespectrals.....	8
2.2.	Sensors d'imatges	11
2.2.1.	Fons de soroll.....	13
2.2.2.	Correcció de les fonts de soroll.....	14
2.2.3.	Hot-píxels	15
2.3.	Quantificació de les desviacions de color	16
2.3.1.	Diferències de color.....	16
2.3.2.	Diferències entre corbes espectrals.....	20
2.3.3.	Mètriques combinades.....	21
2.4.	Aplicacions dels sistemes hiperespectrals	21
3.	OBJECTIUS.....	22
4.	INSTRUMENTACIÓ	23
4.1.	Sistema hiperespectral.....	24
4.2.	Instrumentació complementària	29
5.	METODOLOGIA.....	31
5.1.	Estabilitat en l'emissió del sistema d'il·luminació.....	31
5.2.	Linealitat en la resposta de la càmera.....	32
5.3.	Calibratge del sistema	32
5.3.1.	Calibratge espectral.....	32
5.3.2.	Calibratge radiomètric.....	33
5.4.	Repetibilitat del sistema.....	34
5.5.	Reproductibilitat del sistema	34
6.	RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	35
6.1.	Estabilitat en l'emissió del sistema d'il·luminació.....	35
6.2.	Linealitat en la resposta de la càmera.....	36
6.3.	Calibratge del sistema	37
6.3.1.	Calibratge espectral.....	37
6.3.2.	Calibratge radiomètric.....	39
6.4.	Repetibilitat del sistema.....	41
6.5.	Reproductibilitat del sistema	41
7.	CONCLUSIONS	45
8.	BIBLIOGRAFIA	46

1. INTRODUCCIÓ

La ciència de les imatges espectrals es va començar a desenvolupar fa aproximadament 40 anys, però no va ser fins a principis dels 90' que van començar a utilitzar-se molt, específicament en el camp de l'astrofísica i la teledetecció a nivell militar [Fischer & Kakoulli 2006]. Aquesta ciència es basa en la captura d'imatges en una gran quantitat de diferents bandes espectrals per a obtenir informació espectral de la mostra que es vol estudiar amb una elevada resolució espacial [Chang 2001]. Durant els últims anys ha anat augmentat gradualment la quantitat de camps en què s'utilitzen els sistemes d'imatge espectrals, com per exemple per a estudis de la superfície terrestre i teledetecció [Gianinetto & Lechi 2004; Govender et al. 2009; Hernández-Andrés et al. 2001], en la monitorització dels controls de qualitat en la indústria alimentària [Mehl et al. 2004; Gómez-Sanchis et al. 2008; Qin & Renfu Lu 2008; Naganathan et al. 2008], en la biomedicina [Schultz et al. 2001; Liu et al. 2007; Vo-Dinh 2004; Khoobehi 2004; Stothard et al. 2004], en l'estudi d'obres d'art [Fischer & Kakoulli 2006], entre d'altres.

El motiu principal pel qual els sistemes d'imatge espectrals van guanyant terreny en diferents àmbits i representen un tema de recerca molt actual és que són sistemes que permeten l'obtenció de corbes espectrals píxel a píxel, és a dir, amb molt bona resolució espacial. A més, l'anàlisi dels objectes es porta a terme de manera no destructiva, amb les característiques afegides de que la preparació de la mostra és mínima i l'obtenció de la informació és ràpida.

Fins fa poc les bandes espectrals d'aquests sistemes s'aconseguien mitjançant la utilització d'un nombre limitat de filtres o equivalentment amb una banda de transmissió més o menys ampla. Aquests sistemes, coneguts com a multiespectrals, incorporaven poques bandes (normalment més de quatre i menys de deu) i tenien una resolució espectral acceptable per a algunes aplicacions que estudiaven espectres suaus, tot i que insuficient per a altres que incorporaven l'anàlisi de corbes més abruptes. Recentment han aparegut les càmeres hiperespectrals al mercat, les quals incorporen un espectrògraf davant del sensor d'imatge, la qual cosa permet obtenir una elevada resolució espectral (de pocs nanòmetres) a banda de tenir una excel·lent resolució espacial, superant les limitacions que presentaven els sistemes multiespectrals en aquest aspecte [ElMasry & Sun 2010].

Cal recordar que a nivell industrial té moltíssima importància l'automatització de la fabricació dels productes i l'anàlisi del seu color, ja sigui mitjançant instruments convencionals de mesura o sistemes espectrals dins la cadena de control de qualitat, ja que tradicionalment sempre s'havia utilitzat el sistema visual humà per a dur a terme aquesta gestió. El treball de comparació colorimètrica realitzada per una persona és molt tediós, laboriós, comporta molt de temps i acaba sent inconscient. A més, s'ha de tenir en compte que el consumidor és cada vegada més exigent, de manera que les diferències de color que està disposat a tolerar són mínimes. Per aquest motiu automatitzar i millorar la mesura de desviacions del color implica un gran avenç tecnològic i industrial [ElMasry & Sun 2010].

Així doncs l'objectiu principal d'aquest treball és la posada a punt d'un sistema hiperespectral per a la posterior mesura i càlcul de propietats colorimètriques i espectrals amb una elevada resolució tant espectral com espacial. Amb aquest sistema es podrà per tant caracteritzar amb una elevada precisió el color i les propietats espectrals en punts de mostres no uniformes, és a dir, que presentin patrons espacialment complexos. Cal destacar que fins ara la mesura d'aquestes propietats en aquest tipus de mostres era difícil de portar a terme degut a que els instruments de mesura convencionals, com els espectrofotòmetres o colorímetres, presenten una àrea de mesura relativament gran, per la qual cosa s'assumeix que les seves propietats són uniformes en aquesta regió. Per aquest motiu ha estat neces-

sari realitzar el calibratge del sistema hiperespectral i valorar-ne la seva repetibilitat i reproductibilitat. Tot això es presenta en aquest treball.

Aquesta memòria s'estructura en 8 capítols a part de la introducció present. En el capítol 2 es descriu l'estat de l'art amb la informació rellevant que permet entendre el projecte. En el capítol 3 s'exposen tant l'objectiu genèric com els específics que es volen aconseguir. En el capítol 4 es presenta la instrumentació utilitzada en la realització de les mesures. En el capítol 5 s'explica detalladament la metodologia emprada per la consecució de cadascun dels passos utilitzats en la posada a punt del sistema. En el capítol 6 s'analitzen els resultats obtinguts en l'estudi. Finalment en el capítol 7 es troben les conclusions que s'han pogut extreure del treball i en el capítol 8 la bibliografia utilitzada.

2. ESTAT DE L'ART

En aquest apartat s'exposa el context en què s'ubica el treball de final de màster. En primer lloc es defineixen els sistemes hiperespectrals. Més tard es descriuen els sensors d'imatge utilitzats en aquests sistemes així com les seves propietats més rellevants i els tipus de soroll que generen. Posteriorment hi ha una secció dedicada a quantificar les desviacions espectrals i de color. Com a últim apartat s'inclou una breu explicació de les utilitats dels sistemes hiperespectrals i algunes de les últimes investigacions que s'han realitzat al respecte.

2.1. Sistemes hiperespectrals

En general es pot considerar un sistema espectral com la combinació d'un sistema espectromètric amb un sensor, de manera que es basa principalment en la captació de la llum reflectida o transmesa d'una mostra a través de diverses bandes espectrals en un interval de l'espectre electromagnètic [Zhou et al. 2009; Garini et al. 2006].

Tot i que no hi ha una classificació dels sistemes espectrals establerta, sovint es parla de distingir-los en funció de la quantitat de bandes espectrals que conformen el sistema. D'aquesta manera un sistema monocromàtic conté una sola banda espectral, un sistema tricromàtic conté tres bandes (R,G,B), un sistema multiespectral entre 4 i 9 bandes i un sistema hiperespectral de 10 a centenars de bandes. Alguns autors també defineixen com a sistema hiperespectral aquell que conté un gran nombre de bandes molt properes entre elles, la qual cosa confereix una molt bona resolució espectral al sistema [Gianinetto & Lechi 2004; Kang 2006].

En aquest treball considerarem com a sistemes hiperespectrals aquells composts principalment per un espectrògraf i una càmera digital. És per això que moltes vegades s'anomenen també càmeres hiperespectrals. Amb aquests sistemes es poden obtenir imatges espectrals o hiperespectrals.

Una imatge espectral o hiperespectral és una col·lecció d'imatges preses en diverses bandes de diferent longitud d'ona i que estan alineades espacialment [Chang 2001]. Les bandes es corresponen al nombre total de increments de longitud d'ona ($\Delta\lambda$) en el mostreig, i per tant, com més bandes s'utilitzin en un mateixa mostra major informació espectral s'obindrà. Per exemple, per a una càmera amb un rang espectral visible (380-780nm) i un pas de mostreig de 5nm, hi hauria un total de 81 bandes [Imai & Berns 1999].

És important no confondre la resolució espectral amb la resolució espacial. La resolució espectral d'una imatge es refereix al nombre i a l'amplada de les bandes de l'espectre electromagnètic mesurades pel sensor de la càmera i la resolució espacial es defineix com el nivell de detall espacial representada en una imatge [Govender et al. 2009].

La suma del conjunt de dades resultant de les bandes, és un cub hiperespectral definit per dues dimensions espacials (x,y) i una dimensió per a la longitud d'ona (λ). Aquest cub proporciona les imatges per a cada longitud d'ona (λ_i) d'on s'obté "l'empremta digital o firma espectral" que permet caracteritzar la composició espectral de cada píxel individualment, tal i com es representa en la **Figura 2.1** [Chang 2001; Edelman et al. 2012; Nieman et al. 2006; Gowen et al. 2007].

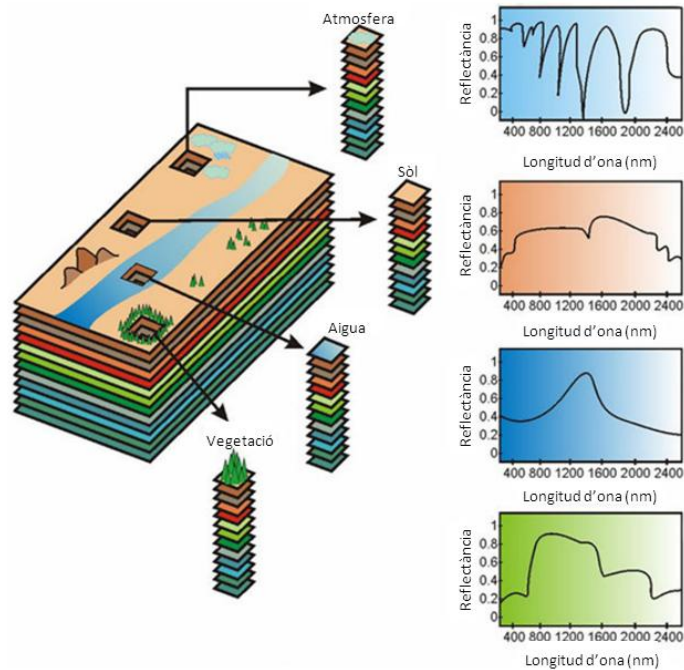


Figura 2.1 Cub hiperespectral de la superfície terrestre. A la dreta es troben les firmes espectrals o empremtes digitals de varis píxels de la imatge hiperespectral. (Extret de: [Plaza, A., & Plaza, J., 2010]).

La informació final obtinguda del cub hiperespectral depèn de tots els elements que formen el sistema, és a dir, de les característiques espectrals de la mostra que es vol estudiar, del sistema d'il·luminació, de la geometria d'observació i de la sensibilitat del detector [Fischer & Kakoulli 2006; Siesler et al. 2002]. A més s'ha de tenir en compte que els sistemes hiperespectrals només poden obtenir simultàniament la informació de dues de les tres dimensions (3D) del cub hiperespectral, provocant que en alguns casos sigui necessari la introducció d'un sistema de desplaçament que permeti realitzar un escaneig temporal. Així doncs, es poden distingir principalment tres tipus de sistemes que permeten l'obtenció del cub hiperespectral: els sistemes d'escaneig en un punt o *whiskbroom* que realitzen la mesura espectral d'un punt i posteriorment fan un escaneig espacial en àrea, els sistemes d'escaneig en una línia o *pushbroom* que realitzen la mesura espectral d'una línia i després fan un escaneig espacial lineal, i els sistemes d'escaneig en una superfície o *staring imagers* que capten una imatge d'una àrea en una banda espectral concreta i després realitzen un escaneig espectral [Figura 2.2], [Edelman et al. 2012; Grahn H.F., Geladi 2007].

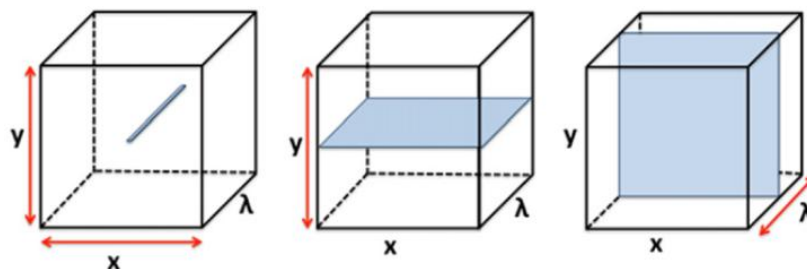


Figura 2.2 Mètodes d'obtenció del cub hiperespectral. Esquerre: Sistema d'escaneig en un punt o *whiskbroom*. Centre: Sistema d'escaneig en una línia o *pushbroom*. Dreta: Sistema d'escaneig en una superfície o *staring imagers*. Les fletxes vermelles indiquen l'escaneig necessari per a completar el cub (Extret de: [Edelman et al. 2012]).

El primer sistema és el d'escaneig en un punt o *whiskbroom* que obté l'espectre complet punt a punt (píxel a píxel) de la mostra, sent així necessari realitzar un escaneig espacial bidireccional mitjançant un sistema de desplaçament. Aquest sistema permet obtenir una gran resolució espectral, però a canvi és necessari una gran quantitat de temps per a posicionar correctament la mostra i assegurar la repetibi-

litat de les dades preses. La llum reflectida de cada punt entra a l'objectiu de la lent i és separada en les diferents longituds d'ona per a ser detectades per a un detector de matriu lineal [Figura 2.3], [Grahn H.F., Geladi 2007; Edelman et al. 2012].

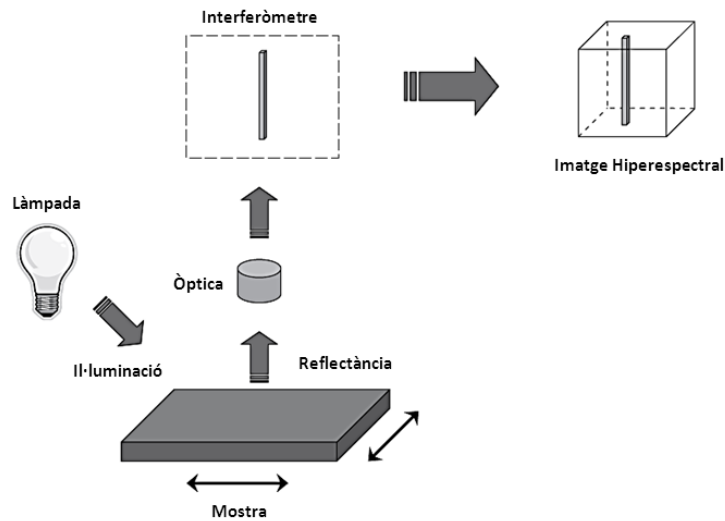


Figura 2.3 Esquema del sistema *whiskbroom* (Extret de: [Grahn H.F., Geladi 2007]).

El segon sistema és el d'escaneig en una línia o *pushbroom* que obté simultàniament la informació espectral continguda en una línia de píxels. És necessari incloure un sistema de desplaçament perpendicular a la direcció de la línia que permeti l'escaneig espacial de la mostra mentre la càmera està estacionada o viceversa. Hi ha dues maneres diferents d'obtenir la informació espectral: en la primera s'il·lumina completament la mostra i el sistema espectral adquireix la informació d'una sola secció lineal i en la segona la mostra només és il·luminada per un estret feix de llum. La llum lineal reflectida de la mostra passa a través d'un prisma que dissocia la llum i arriba al sensor matriu [Figura 2.4], [Bianco et al. 2003; Edelman et al. 2012].

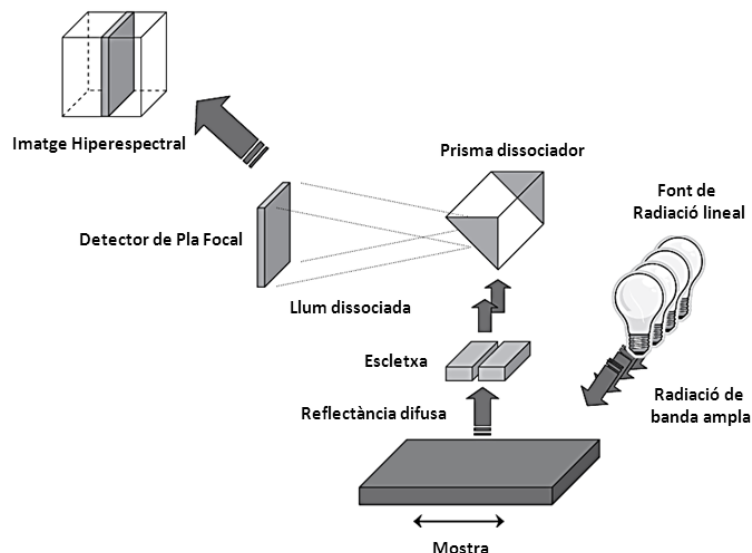


Figura 2.4 Esquema del funcionament del sistema *pushbroom* (Extret de: [Grahn H.F., Geladi 2007]).

Per últim, el tercer sistema és el d'escaneig d'una superfície o *staring imagers*, on la mostra es disposa en el pla focal del sistema espectral de manera que no necessita ser desplaçada. Per a completar la informació del cub hiperespectral es realitza un escaneig espectral per a recollir una seqüència d'imatges monocromàtiques d'una única longitud d'ona. Aquesta longitud d'ona entrant acostuma a ser modulada amb filtres sintonitzables [Figura 2.5], [Grahn H.F., Geladi 2007].

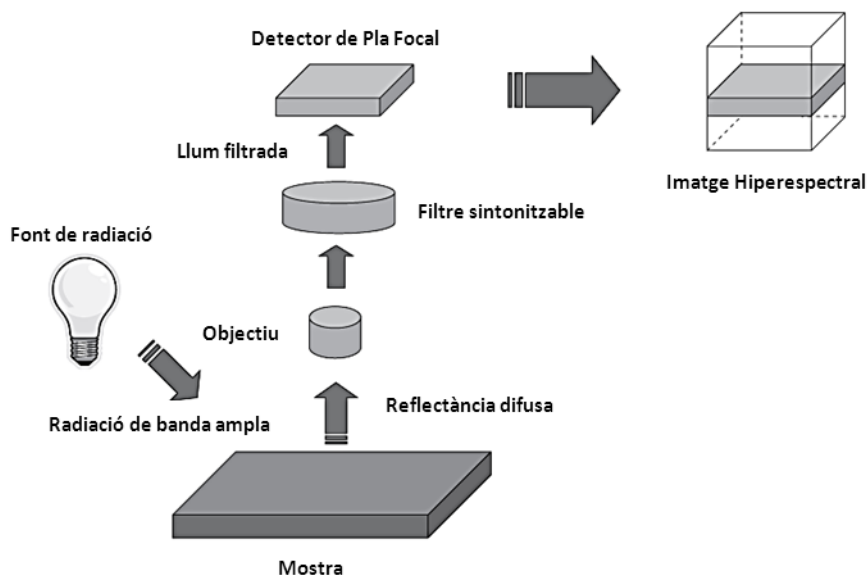


Figura 2.5 Esquema del funcionament del sistema *staring imagers* (Extret de: [Grahn H.F., Geladi 2007]).

Així es pot afirmar que aquests sistemes no poden obtenir tota la informació del cub hiperespectral simultàniament i per tant necessiten una major quantitat de temps per a l'obtenció de la informació, de manera que són adequats per a l'estudi d'objectes estacionaris. Si es volguessin realitzar estudis de mostres que es mouen *in vivo*, s'hauria de plantejar l'ús d'un altre tipus de sistema [Themelis et al. 2008].

2.2. Sensors d'imatges

Un dels aspectes fonamentals d'un sistema hiperespectral és la captura de la imatge amb l'ajuda d'un detector bidimensional per a obtenir tant la informació espacial com espectral de la mostra a estudiar. Els sensors utilitzats en aquests casos acostumen a ser generalment detectors semiconductors fotovoltaics, que exploren les propietats electròniques dels materials semiconductors com poden ser el silici (Si), el germani (Ge) o l'arseniür de gal·li (GaAr) [Elmasry & Sun 2010].

Els sensors més utilitzats en els sistemes hiperespectrals són les càmeres digitals CCD (*Charge-Coupled Devices*) i CMOS (*Metal Oxide Semiconductor*), que es van començar a desenvolupar sobre la dècada dels 70' i la popularitat de les quals va anar augmentant gràcies a la seva alta resolució i eficiència, la seva àmplia resposta espectral, la poca producció de soroll, juntament amb un baix consum i una bona durabilitat. Els dos tipus de sensors semiconductors de metall-òxid pixelats converteixen els fotons incidents en electrons, formant així una senyal elèctrica proporcional a la quantitat de llum que arriba i complint una funció de mostreig espacial [Healey & Kondepudy 1994; Litwiller 2001].

En el sensor CCD quan l'exposició és completa, la càrrega de cada píxel és transferida seqüencialment a una estructura de sortida comuna per a ser convertides en voltatge, guardades en una memòria intermèdia (buffer) i enviades fora del xip com una senyal analògica de voltatge. D'aquesta manera tota l'àrea del píxel pot ser dedicada a capturar la llum i per tant la uniformitat de la senyal de sortida és alta, proporcionant una millor qualitat d'imatge. En canvi en el sensor CMOS, cada píxel té la seva pròpia conversió càrrega-voltatge i a més el sensor sovint inclou amplificadors, correcció del soroll i circuits de digitalització, que permeten que la informació a la sortida del xip siguin bits digitals. En conseqüència s'incrementa la complexitat del disseny i es redueix l'àrea disponible per a la captura de la senyal, produint una uniformitat més baixa [Figura 2.6]. En la Taula 2.1 es poden observar i comparar

algunes de les característiques generals del sensor CCD i CMOS [D Litwiller 2001; Dave Litwiller 2005; Janesick 2001; Holts & Lomheim 2007].

Es poden obtenir sistemes hiperespectrals especialitzats en diferents rangs de l'espectre, depenent del material semiconductor del que estigui format el sensor. D'aquesta manera un sensor de silici (Si) permet adquirir el rang espectral des de l'ultraviolat proper, passant pel visible i agafant part de l'infraroig proper (aproximadament de 250 a 1200 nm) i un sensor de indi, gal·li i arsènic (InGaAs) permet captar el rang de l'infraroig fins a 1.7µm sense refrigeració i fins a 2.5µm amb refrigeració [Grietens 2009; Klein et al. 2008].

Característiques	CCD	CMOS
Senyal de sortida del píxel	Paquet d'electrons	Voltatge
Senyal de sortida del xip	Voltatge (analògic)	Bits (digital)
Factor de ompliment	Alt	Moderat
Desajust dels amplificadors	N/A	Moderat
Soroll del sistema	Baix	Moderat
Responsivitat	Moderat	Lleugerament millor
Rang dinàmic	Alt	Moderat
Uniformitat	Alt	Moderat
Shutter uniforme	Alt	Pobre
Velocitat	Moderada a Alta	Més alta
Regió d'interès (Windowing)	Limitat	Extens
Antidesbordament (Antiblooming)	Alt a nul	Alt
Alimentació i rellotge	Múltiple, més alt voltatge	Únic, baix-voltatge
Complexitat del sistema	Alt	Baix
Complexitat del sensor	Baix	Alt
Components de la càmera	Sensor + múltiples xips de suport + Lent	Sensor + xips de suport 0 addicional
Cost relatiu I+D	Més baix	Més alt
Cost relatiu del sistema	Depèn de l'aplicació	Depèn de l'aplicació

Taula 2.1 Taula resum de les característiques més generals dels sensors CCD i CMOS [D Litwiller 2001; Dave Litwiller 2005].

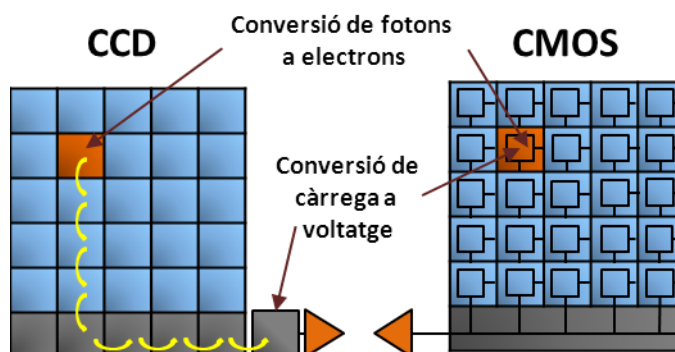


Figura 2.6 Esquema del funcionament d'un sensor CCD i d'un sensor CMOS (Extret i modificat de: [D Litwiller 2001]).

2.2.1. Fonts de soroll

La fiabilitat de la informació donada per un sistema hiperespectral depèn principalment de la qualitat de les dades obtingudes. Tot i el gran avenç en els sensors CCD i CMOS, es continua capturant suficient soroll com per a afectar l'extracció d'informació i la seva interpretació. D'aquesta manera és necessària la quantificació i resolució del soroll a través del calibratge del sistema abans de començar a realitzar mesures, per a tenir la certesa de que aquestes seran segures i repetibles [Beyer 1992; Othman 2006; Healey & Kondepudy 1994].

El soroll d'un sensor d'imatge digital es pot classificar en dos grups: soroll temporal que pot ser reduït amb l'omitjanat d'imatges i que inclou el soroll de tret, el de soroll de quantificació i el soroll de lectura, entre d'altres; i el soroll espacial on una part pot ser disminuïda amb tècniques de correcció de guany/offset i es basa principalment en el soroll de corrent fosca i el de la no-uniformitat en la fotoresposta [Kodak 2005].

- Soroll de tret (*Shot noise*):

Es tracta d'un soroll temporalment dependent associat als fotons que arriben de manera aleatòria al detector. És un límit natural en els sistemes detectors de llum i per tant està governat per l'estadística de Poisson sent igual a l'arrel quadrada de la senyal.

- Soroll de quantificació:

És un soroll inherent al procés de conversió analògica-digital. Els circuits conversors produeixen nivells digitals de sortida discrets, de manera que un cert rang d'entrades (voltatges) similars poden produir la mateixa sortida. És un soroll de zero de mitjana i independent de la senyal.

- Soroll de lectura (*read noise*):

És el soroll electrònic additiu a la senyal final per sobre de la lectura del dispositiu i independent a l'exposició del temps. Es produeix també en la conversió analògica-digital. Aquest soroll pot ser aïllat i eliminat amb la sostracció de la imatge *bias*. Aquesta imatge *bias* és la que s'aconsegueix amb un temps d'exposició zero sense que la càmera estigui exposada a la llum. D'aquesta manera es pot aïllar a causa de que el soroll tèrmic produït per l'escalfor del sistema electrònic i la contribució de l'exposició de la llum és mínima [Collen-Gino 2004].

- Soroll de corrent fosca:

A causa d'un procés tèrmic produït per l'escalfor de la pròpia càmera, es produeixen electrons que estan a un estat intermedi d'excitació independentment de l'existència de senyal lluminosa, i són contactats com a senyal en el procés de detecció. Aquest soroll és multiplicatiu, i el seu nivell és proporcional a l'exposició, provocant així dos sorolls diferents.

Un primer soroll és el de la no-uniformitat de la corrent fosca (*Fixed Pattern Noise, FPN*) que és creat a causa de que cada píxel genera una lleugera diferència de quantitat de corrent fosca. Aquest soroll pot ser eliminat sostraint una imatge fosca de referència a cada imatge, realitzant-la a la mateixa temperatura i amb el mateix temps d'exposició que la imatge a corregir. El segon es tracta del soroll de tret de la corrent fosca: aquest soroll no pot ser eliminat i és igual a l'arrel quadrada de la imatge fosca de referència.

- No-uniformitat en la foto-resposta (*Photo Response Non-Uniformity*, PRNU)

Es forma a causa de les petites diferències de sensibilitat a la llum entre els píxels degut a les variacions donades en el procés de fabricació. En conseqüència en un camp uniforme es pot percebre una lleugera variació de la senyal entre píxels de l'orde del 1-2%. Aquest soroll és dependent de la senyal i pot ser eliminat aplicant correccions de camp uniforme.

2.2.2. Correcció de les fonts de soroll

És imprescindible disminuir al màxim les fonts de soroll en qualsevol sistema d'imatge, sobretot en aquelles aplicacions en què es necessita una elevada precisió i resolució espacial. Com ja s'ha comentat, la superposició d'imatges pot disminuir el soroll temporal, però no funciona amb la no-uniformitat de la corrent fosca i la no-uniformitat en la foto-resposta.

Les dues tècniques més utilitzades per a corregir aquests últims tipus de soroll són el calibratge del detector mitjançant dues imatges, una fosca i una de camp uniforme que es combinen linealment amb la imatge per a corregir-la espacialment. L'altra tècnica consisteix en l'aplicació d'algoritmes sobre la imatge original per a obtenir una millora en la qualitat de la imatge [De Lasarte et al. 2007]. Existeix una gran varietat de tècniques en funció de l'algoritme que s'utilitza: algoritmes estadístics [Hayat et al. 1999], de moviment [Hardie et al. 2000], algebraics [Ratliff et al. 2002], el mètode de la covariància inversa [S. Torres et al. 2003] i tècniques de filtratge vectorial [Lukac & Smolka 2005]. També s'ha desenvolupat una tècnica de correcció que millora la precisió radiomètrica.

Sobre la primera tècnica pel calibratge del detector, la imatge fosca es capta amb el fotosensor cobert i la imatge de camp uniforme es pren d'un camp uniformement il·luminat. Tot i que existeixen dues variants d'aquesta tècnica, ambdues imatges han de ser preses amb les mateixes condicions de temperatura i de temps d'exposició que la imatge a corregir.

Així, en la primera variant la imatge de camp uniforme es correspon a la imatge d'una superfície gris uniforme o a una pantalla il·luminada, situada en la posició exacta d'on s'agafaran posteriorment les imatges a corregir [Collen-Gino 2004, Tyson 1986, Janesick 2001]. Si s'assumeix que la imatge de la superfície gris és completament uniforme, aquesta podrà ser utilitzada per a compensar numèricament l'efecte de la no-uniformitat espacial [Thomson & Westland 2001] en cada una de les imatges adquirides utilitzant el sistema. Per a dur-ho a terme, es captura una imatge de camp uniforme i es sostrau la seva imatge fosca presa amb el mateix temps d'exposició. D'aquesta manera la imatge de camp uniforme corregida per la imatge fosca és la que s'utilitzarà com a imatge de camp uniforme en el calibratge. En el cas de crear varies imatges mitjançant l'ús de filtres, s'obté una imatge de camp uniforme per a cada filtre.

El procés bàsic del calibratge es descriu matemàticament mitjançant l'equació:

$$DL_c(i,j) = \frac{DL(i,j) - DL_0(i,j)}{DL_{cu}(i,j)} \quad (2.1)$$

On $DL_c(i,j)$ són els nivells digitals del píxel (i,j) de la imatge corregida en, DL representa la imatge no corregida inicial, $DL_0(i,j)$ és la imatge fosca i $DL_{cu}(i,j)$ representa la imatge de camp uniforme (corregida per la imatge fosca).

La segona variant consisteix en aplicar un algoritme lineal. En aquest, la imatge de camp uniforme correspon a la imatge d'un camp de radiància uniforme i es denomina imatge base de la correcció. Normalment s'utilitza com a imatge base la denominada imatge brillant [Aikens et al. 1989], que es defineix com la imatge amb el nivell digital mitjà més elevat sense tenir cap píxel saturat. La imatge fosca i la imatge base es combinen amb la imatge a corregir mitjançant dos algoritmes lineals [Vliet et al. 1998]. En el primer les imatges es combinen directament segons l'equació:

$$DL_c(i, j) = k \frac{DL(i, j) - DL_0(i, j)}{DL_B(i, j) - DL_0(i, j)} \quad (2.2)$$

On $DL_0(i, j)$ i $DL_B(i, j)$ són els nivells digitals del píxel (i, j) de la imatge fosca i de la imatge base, respectivament i k , és una constant de calibratge que s'estima com el nivell digital mitjà de la imatge resultant de la diferència entre la imatge i la base i la imatge fosca. El segon algoritme lineal es basa en el càlcul de matrius de guany i offset [Aikens et al. 1989]:

$$DL_c(i, j) = O(i, j) + G(i, j)DL(i, j) \quad (2.3)$$

$$G(i, j) = \frac{DL_B - DL_0}{DL_B(i, j) - DL_0(i, j)} \quad (2.4)$$

$$O(i, j) = DL_0 - G(i, j)DL_0(i, j) \quad (2.5)$$

On $O(i, j)$ ($i = 1, \dots, m$ y $j = 1, \dots, n$) representa l'element (i, j) de la matriu de offset de la correcció O , $G(i, j)$ representa l'element (i, j) de la matriu de guany de la correcció G , i DL_0 i DL_B són els nivells digitals de referència de la imatge fosca i de la imatge base de la correcció, respectivament. Normalment s'utilitza com a nivell digital de referència el nivell digital mitjà de les imatges [Aikens et al. 1989]. Com es menciona anteriorment, el nivell digital de referència i la imatge de correcció base que usualment s'utilitza són el nivell digital mitjà i la imatge brillant, respectivament. Tot i que utilitzar aquests valors produeix resultats acceptables, la correcció de la no-uniformitat pot ser millorada significativament aplicant l'algoritme lineal però utilitzant uns altres valors. La influència de la imatge fosca, que pot tenir valor zero o diferent a zero, la imatge de correcció base, que pot ser diferent a la imatge brillant utilitzada fins ara, i el nivell digital de referència, que pot ser diferent a la mitja usada normalment, han estat estudiats per a optimitzar l'algoritme de correcció de la no-uniformitat espacial [De Lasarte et al. 2007].

2.2.3. Hot-píxels

Tot i corregir gran part del soroll, els sensors CCD i CMOS tendeixen a disminuir el seu rendiment de manera permanent a causa de la dosi total de ionització i el danys de desplaçament. La dosi total de ionització provoca torns de llinar de tensió i el dany de desplaçament provoca una reducció de l'eficiència en la transferència de càrrega, incrementa i produeix irregularitats en la corrent fosca i a més crea soroll aleatori en píxels aïllats [C. J. Marshall et al. 2005]].

D'aquesta manera es pot definir com a *hot-pixel* aquell píxel que presenta una alta quantitat de corrent fosca estadísticament anormal en comparació amb la resta del sensor i que en conseqüència genera una senyal excessiva en absència de il·luminació. En una imatge capturada, aquesta senyal addicional afegeix un desplaçament (*offset*) a píxels aleatoris, que depèn del temps d'exposició. Per tant, com més augmenti el temps d'exposició, major serà el desplaçament i més disminuirà la capacitat de recollida de llum del píxel. Un cop que el píxel es satura la informació addicional sobre qualsevol

il·luminació es perd i per tant el valor d'aquell píxel deixa de ser funcional per a mesures posteriors [Jozsef Dudas et al. 2007; J. Dudas et al. 2007; Leung et al. 2009]. El *hot-pixel* pot ser descrit per la següent fórmula:

$$I_{pixel} = m[(R_{photo}T_{exp}) + (R_{dark}T_{exp})] \quad (2.6)$$

On I_{pixel} està mesurat en una escala de 0 a 1, on 0 representa un píxel fosc i 1 un píxel saturat. R_{photo} és la sortida del píxel com a una funció de la intensitat de la il·luminació incident, R_{dark} és la intensitat de la corrent fosca present en tots els píxels, T_{exp} és el temps d'exposició (mesurat en segons), i m és la sensibilitat del píxel.

La solució estàndard per a la correcció dels *hot-pixels* consisteix en extreure una imatge fosca, que ha de ser capturada amb el mateix temps d'exposició que la mostra a examinar i amb l'obturador tancat. No obstant, quan un píxel està saturat el software no és capaç de recuperar correctament el valor de la il·luminació i es crea un píxel fosc. Una altre solució consisteix en emmascarar el *hot-pixel* per interpolació de la informació dels píxels del seu voltant, produint també l'eliminació de la informació recollida en aquest píxel [Figura 2.7], [Jozsef Dudas et al. 2007; J. Dudas et al. 2007].

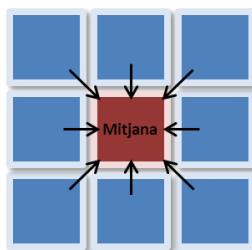


Figura 2.7 Interpolació del hot-pixel.

2.3. Quantificació de les desviacions de color

Hi ha varies maneres de quantificar les desviacions del color. Entre ells les més conegudes són el càlcul de les diferències de color i les mètriques per a trobar les diferències entre corbes espectrals; tot i que actualment també s'estan estudiant mètriques combinades [Imai et al. 2002].

2.3.1. Diferències de color

Una de les maneres per a poder quantificar les desviacions del color còmodament, és treballar en un espai euclidià on sigui possible correlacionar una diferència de color amb una mesura de la distància [Capilla et al. 2002]. A continuació es mostren alguns dels espais i fórmules de diferència de color més conegudes i utilitzades per a la mesura de les diferències de color.

- CIELAB 1976

La resposta sensorial de l'ull humà no és lineal amb la quantitat d'estímul, és a dir, la diferència de sensació de color que pot obtenir una persona i la diferència en valors triestímul en els espais convencionals definits per la CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) (RGB i XYZ 1931) no coincideixen. Per aquest motiu la CIE l'any 1976 va proposar el sistema CIELAB, que és una aproximació matemàtica a un espai uniforme, on la diferència entre la percepció de l'ull humà i la diferència dels valors triestímul queda més o menys correlacionada [Tominaga 1990; Ganesan 2010; Capilla et al. 2002; Hill et al. 1997]. Les seves coordenades L^* , a^* , b^* es defineixen amb les equacions:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_W}\right) - 16 \quad (2.7)$$

$$a^* = 500\left[f\left(\frac{X}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_W}\right)\right] \quad (2.8)$$

$$b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_W}\right)\right] \quad (2.9)$$

On:

$$f(\omega) = \omega^{\frac{1}{3}} \quad f > 0,008856 \quad (2.10)$$

$$f(\omega) = 7,787\omega + \frac{16}{116} \quad f \leq 0,008856 \quad (2.11)$$

L^* és la claredat de color que té un rang de 0 (negre) a 100 (blanc), a^* és el grau de verd-vermell de la mostra (si a^* és negatiu indica verd i positiu indica vermell) i b^* és el grau de blau-groc (si b^* és negatiu indica blau i positiu indica groc) [Figura 2.8]. Els valors X_w , Y_w i Z_w són els valors triestímul del blanc de referència.

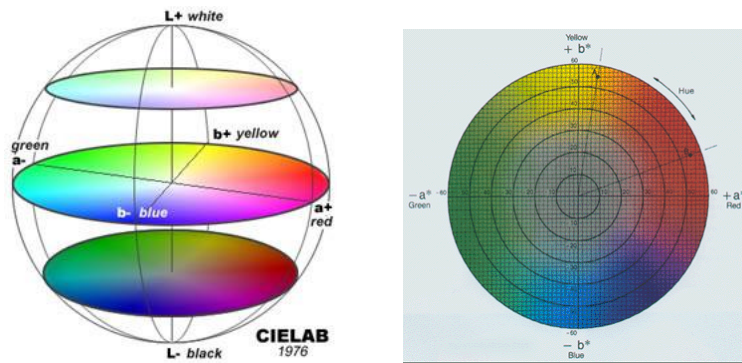


Figura 2.8 Esquema de les coordenades CIELAB.

A partir de les coordenades CIELAB, la diferència de color entre dos punts o colors queda definida directament com la distància euclidiana:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2.12)$$

O bé expressat en termes de coordenades polars:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta C^{*2} + \Delta H^{*2}} \quad (2.13)$$

On C és el cromà i ΔH es calcula amb la fórmula següent:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2.14)$$

$$h^* = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2.15)$$

$$\Delta H^* = 2\sqrt{C_1^* \cdot C_2^*} \sin\left(\frac{\Delta h^*}{2}\right) \quad (2.16)$$

On h (en graus) és l'angle de to.

Com ja s'ha comentat, el sistema CIELAB és una aproximació matemàtica, el que comporta que a nivell pràctic no sigui del tot uniforme. Es tracta d'un espai limitat a ser aplicat en certes condicions d'observació que es troben normalment, de manera que en algunes altres situacions pot ser apropiat l'ús de coeficients que ponderin de manera diferent cadascuna de les coordenades per tal de realitzar una mesura més aproximada de la diferència de color percebuda [Hill et al. 1997; Wyszecki & Stiles 1982]. Tot i així, l'espai CIELAB és comunament utilitzat en la indústria, sobretot en aquelles relacionades amb la barreja de color sostractiva [Assefa 2010].

- CMC

Durant el 1984 el "Comitè de mesura del color de la societat de tintorers i coloristes" (*Color Measurement Comitee of the Society of Dyers and Colourists*) va desenvolupar una nova fórmula coneguda com a CMC o ΔE_{CMC} , per a intentar corregir el sistema CIELAB. Aquesta fórmula és recomanada per algunes organitzacions com la Organització Internacional d'Estandardització (ISO). A part és la més utilitzada en les indústries tèxtil, de plàstics i de pintures [Geol Lee et al. 2011; Capilla et al. 2002]. La seva equació partint dels valors de l'espai CIELAB és:

$$\Delta E_{CMC(1:c)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{lS_l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{cS_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{S_H}\right)^2} \quad (2.17)$$

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2} \quad (2.18)$$

On ΔH^* es defineix com la part de la diferència de color CIELAB, calculada amb (2.18), que no és atribuïble a diferències de claredat i croma. S_L , S_C , i S_H són funcions de pes pels atributs de claredat, croma i to, respectivament. l i c són factors que ponderen addicionalment la claredat i el croma segons per a què s'aplica la fórmula.

- CIELAB 1994

Més endavant la CIE (1995) va proposar una versió revisada de la fórmula CMC anomenada CIE94 (ΔE_{94}) per a ser aplicada en unes condicions d'observació específica [Capilla et al. 2002]:

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (2.19)$$

On S_L , S_C i S_H :

$$S_L = 1 \quad (2.20)$$

$$S_C = 1 + 0.045 \cdot C^* \quad (2.21)$$

$$S_H = 1 + 0.015 \cdot C^* \quad (2.22)$$

Els paràmetres K_L , K_C i K_H , són factors que permeten ajustar les contribucions relatives de les diferències de claredat, croma i to, respectivament, en funció de les condicions de visualització i d'aplicació quan aquestes són diferents de les condicions de referència descrites a la Taula 2.2. Per tant, si es segueixen les condicions de referència el valor dels paràmetres és 1.

Il·luminant	Simulador CIE del il·luminant D65
Il·luminació	1000 lux
Observador	Visió del color normal

Fons	Uniforme i acromàtic, amb $L^*=50$
Mètode de visualització	Objecte
Mida de la mostra	Major de 4º
Separació entre mostres	Bores coincidents
Magnitud de la diferència de color	De 0 a 5 unitats CIELAB
Estructura de la mostra	Uniforme

Taula 2.2 Condicions de referència per a l'ús de la fórmula CIE94 [Capilla et al. 2002].

- CIEDE2000

Més endavant, l'any 2001, la CIE va publicar una nova fórmula millorada pels procediments de càlcul de les diferències de color a nivell industrial, la qual va ser descrita per Luo et al. l'any 2001 [Luo et al. 2001]. A més, va ser optimitzada per les diferències de la percepció del color amb l'objectiu de millorar la correlació dels colors blaus, dels colors foscos i dels colors neutres [Geol Lee et al. 2011; Sharma et al. 2005]. Aquesta nova fórmula té una estructura similar a les equacions CMC i CIE94, però afegint un nou terme de rotació [Luo et al. 2001]:

$$CIEDE200 = \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H}\right)^2\right]} + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right) \quad (2.23)$$

On:

$$L' = L^* \quad (2.24)$$

$$a' = a^* (1 + G) \quad (2.25)$$

$$b' = b^* \quad (2.26)$$

$$C' = \sqrt{a'^2 + b'^2} \quad (2.27)$$

$$h' = \tan^{-1}(b'/a') \quad (2.28)$$

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^{*7}}{\bar{C}^{*7} + 25^7}} \right) \quad (2.29)$$

El valor de \bar{C}^* , és la mitjana aritmètica dels valors C^* per a una parella de mostres. El càlcul de les diferències de claredat, de croma i d'angle de to es realitza mitjançant les següents equacions:

$$\Delta L' = L'_b - L'_s \quad (2.30)$$

$$\Delta C' = C'_b - C'_s \quad (2.31)$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_b C'_s} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \quad (2.32)$$

$$\Delta h' = h'_b - h'_s \quad (2.33)$$

On:

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \quad (2.34)$$

$$S_C = 1 + 0,045 \cdot \bar{C}' \quad (2.35)$$

$$S_H = 1 + 0,015 \cdot \bar{C}'T \quad (2.36)$$

l:

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{h}') + 0,32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ) \quad (2.37)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_c \quad (2.38)$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{(\bar{h}' - 275^\circ)}{25}\right]^2\right\} \quad (2.39)$$

$$R_c = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \quad (2.40)$$

S'ha de tenir en compte que \bar{L}' , \bar{C}' , i \bar{h}' és la mitjana aritmètica dels valors L' , C' i h' per a un parell de mostres. Per a calcular el valor de h' , és necessari tenir present que els colors tenen angles de tonalitat en diferents quadrants, per exemple un estàndard i una mostra amb l'angle de to de 90° i 300° , tindrà un valor mitjà de 195° , que difereix de 15° que és la resposta correcte. Aquest resultat es pot aconseguir mitjançant la comprovació de la diferència absoluta entre dos angles de to, de manera que si la diferència és menor a 180° , s'ha d'utilitzar la mitjana aritmètica, però si és major a 180° se li ha de restar 360° a l'angle més gran i després realitzar la mitjana aritmètica. Per tant, seguint l'exemple anterior seria: $300^\circ - 90^\circ = 210^\circ$ i la mitjana aritmètica quedaria: $(90^\circ - 210^\circ)/2 = -60^\circ$.

2.3.2. Diferències entre corbes espectrals

Una altra de les maneres per a quantificar les desviacions de color, és amb l'ajuda de mètriques que comparen directament corbes espectrals. A continuació es mostren algunes de les mètriques més utilitzades d'aquest tipus: l'arrel quadrada de l'error quadràtic mitjà i el GFC [Assefa 2010].

- RMSE: *Root Mean Square Error*

Es tracta d'una mètrica molt simple que ha estat utilitzada per a calcular les diferències espectrals en molts estudis [Imai et al. 2002]. L'equació de l'arrel quadrada de l'error quadràtic mitjà entre dos vectors x_1 i x_2 és [Assefa 2010]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2}{n}} \quad (2.41)$$

On n representa la longitud dels vectors. Per a una coincidència perfecte entre dos vectors, el RMSE serà zero, i per la pitjor de les coincidències tendirà cap a l'infinit. Aquesta mètrica no està afectada pels valors absoluts de l'espectre (blanc i negre) ni considera en cap cas les propietats del sistema visual. Per aquest motiu es va proposar una variació d'aquesta, la mètrica RMSE ponderada, on sí que es consideren algunes d'aquestes propietats. La seva equació general és [FH Imai et al. 2002]:

$$WRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda=1}^n (\sqrt{w(\lambda)} \Delta\beta(\lambda))^2}{n}} \quad (2.42)$$

On $w(\lambda)$ és la ponderació, n és el nombre de longituds d'ona, i $\Delta\beta(\lambda)$ és la diferència entre els dos espectres. Sovint $w(\lambda)$ inclou informació espectral del il·luminant i de l'observador patró, de manera que

en el càlcul del paràmetre tenen més pes aquelles longituds d'ona on hi ha una major contribució d'aquests dos factors.

- GFC: *Goodness-of-fit Coefficient*

El GFC està basat en la desigualtat de Schwartz i donats dos vectors x_1 i x_2 cadascun d'ells amb longitud n , es descriu per l'equació:

$$GFC = \frac{|\sum_{i=1}^n (x_{1i}x_{2i})|}{\sqrt{|\sum_{i=1}^n (x_{1i})^2|} \sqrt{|\sum_{i=1}^n (x_{2i})^2|}} \quad (2.43)$$

El rang del GFC es troba entre 0 i 1, on 1 indica una coincidència perfecte entre els dos vectors de l'espectre [Assefa 2010]. Es considera que $GFC \geq 0.995$ és una correspondència colorimètrica acceptable, que $GFC \geq 0.999$ és una correspondència colorimètrica bona i que $GFC \geq 0.9999$ és una correspondència colorimètrica excel·lent [Hernández-Andrés et al. 2001].

- IRE : Percentatge d'error de reflectància integrat

És una mètrica similar a RMSE però es calcula en base a la diferència entre les àrees sota les corbes espectrals [López-Álvarez 2008].

$$IRE (\%) = \frac{\sum_{\lambda} |r_1(\lambda) - r_2(\lambda)| \cdot \Delta\lambda}{\sum_r r(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (2.44)$$

2.3.3. Mètriques combinades

Alternativament, en l'actualitat s'està investigant la manera de combinar les dues categories anteriors de paràmetres per a desenvolupar mètriques que permetin arribar a compromisos raonables entre les diferències colorimètriques i les corbes espectrals, i així provar d'obtenir una informació millorada sobre les diferències de color [Zhao & R. S. Berns 2007].

Un exemple de mètrica combinada és la CSCM formada pel GFC com a mètrica espectral, pel ΔE del sistema CIELAB com a diferència de color i per la mètrica IRE (%), per a comparar corbes espectrals en il·luminants naturals, on la seva equació és [López-Álvarez 2005; López-Álvarez 2008]:

$$CSCM = \log(1 + 1000(1 - GFC)) + \Delta E^* + IRE(\%) \quad (2.45)$$

2.4. Aplicacions dels sistemes hiperespectrals

Les imatges espectrals es van començar a utilitzar fa uns 40 anys i fins al començament dels anys 90 s'utilitzaven exclusivament per a l'astrofísica i la teledetecció en aplicacions a nivell militar [Fischer & Kakoulli 2006]. Actualment són múltiples les utilitats en que s'està investigant amb les càmeres hiperespectrals.

Les aplicacions més conegudes són els estudis de la superfície terrestre, ja siguin de caràcter geològic [Gianinetto & Lechi 2004], vegetatiu i de l'aigua [Govender et al. 2009] sobre zones concretes de la superfície terrestre a través de la captura d'imatges per satèl·lit o des d'un aeroplà. També cal incloure els estudis sobre els fenòmens atmosfèrics com poden ser els núvols i l'arc de Sant Martí o el propi cel [Hernández-Andrés et al. 2001, López-Álvarez 2008].

La monitorització dels controls de qualitat en la indústria alimentària és una àrea que poc a poc va guanyant força, de tal manera que s'estan utilitzant els sistemes hiperespectrals principalment en l'espectre visible i en l'infraroig per a comprovar l'estat d'aliments i descartar aquells que no són aptes pel seu consum, de manera no destructiva. Alguns exemples en el camp de l'alimentació inclouen l'estudi de cogombres [Ariana et al. 2006] i pomes danyades [R Lu 2003; Mehl et al. 2004], de mandarinetes afectades per la *Penicillium digitatum* [Gómez-Sanchis et al. 2008], de la mesura de les propietats de fruites i verdures [Qin & Renfu Lu 2008; Gowen et al. 2007; R Lu 2003] o de l'estat de la carn [Naganathan et al. 2008].

Altres aplicacions recents dels sistemes hiperespectrals són:

- La captura i anàlisi d'imatges a través d'un microscopi [Schultz et al. 2001].
- L'ajuda al diagnòstic de certes malalties de manera no invasiva, com poden ser el càncer [Martin et al. 2006], l'estudi de la llengua per a complementar el diagnòstic tradicional xinès [Liu et al. 2007], ajudar a conèixer condicions mèdiques com mostres *in vitro* o òrgans de persones [Vo-Dinh 2004], la mesura de la saturació d'oxigen en el cap del nervi òptic [Khoobehi 2004], etc.
- La captura d'una imatge espectral en temps real de gasos com pot ser el metà [Stoithard et al. 2004].
- L'observació dels núvols de gel de CO₂ a Mart [Montmessin et al. 2007].
- La determinació de la localització i la distribució de pigment en les cèl·lules de cianobacteris *in vivo* amb imatges hiperespectrals confocals de fluorescència [Vermaas et al. 2008].
- L'obtenció d'una gran quantitat d'informació sobre pintures i altres obres d'art, com pot ser l'estat del seu deteriorament, el tipus de pigment utilitzat per poder-les restaurar, o fins i tot conèixer si hi ha altres imatges a sota de la pintura a través de l'anàlisi de la banda infraroja de l'espectre [Fischer & Kakoulli 2006].
- L'anàlisi d'empremtes digitals, cabell, cops, pigments, pintures i fibres, en estudis forenses [Edelman et al. 2012].

3. OBJECTIUS

En aquest apartat s'expliquen els objectius plantejats en aquest estudi. L'objectiu genèric d'aquest treball és posar a punt un sistema d'imatges hiperespectral per a poder mesurar finalment desviacions de color en mostres amb patrons espacialment complexos. Per a poder assolir l'objectiu genèric anterior es portaran a terme els següents objectius específics:

- Objectiu específic 1: Posada a punt del sistema hiperespectral.

En aquest objectiu es posarà a punt el sistema hiperespectral, format per una càmera CCD i un objectiu acoblats a un espectrògraf, una font de llum uniforme de sostre i una cinta de desplaçament lineal amb motor pas a pas. Per assolir aquest objectiu caldrà també desenvolupar el programari específic per controlar tots els elements del sistema i verificar-ne el seu funcionament.

- Objectiu específic 2: Calibratge del sistema hiperespectral.

En aquest objectiu es procedirà a comprovar el bon funcionament del sistema hiperespectral construït, verificant alguns aspectes preliminars que assegurin el seu correcte ús com l'estabilitat de la làmpada i la linealitat en la resposta de la càmera. Posteriorment es realitzarà el calibratge del sistema, tant a nivell espectral com radiomètric. Això garantirà la bona mesura de la reflectància espectral de mostres mitjançant el sistema desenvolupat.

- Objectiu específic 3: Mesura de la repetibilitat i reproductibilitat del sistema.

En aquest objectiu s'analitzarà tant la repetibilitat com la reproductibilitat del sistema hiperespectral en termes de mesura de reflectància espectral de diverses mostres. Amb aquesta finalitat s'implementarà un sistema de càlcul de desviacions de color entre mostres, incorporant fórmules de diferències de color, anàlisi de diferències de corbes espectrals i mètriques combinades. Les fórmules s'implementaran en el llenguatge de programació MATLAB.

4. INSTRUMENTACIÓ

En aquest capítol s'explica el material utilitzat per al desenvolupament del projecte. D'aquesta manera es presenta un primer apartat on s'especifiquen quins són els dispositius que configuren pròpiament el sistema hiperespectral, la seva funció i les característiques principals de cada un d'ells. En el segon apartat es troba la instrumentació complementària que també s'ha utilitzat al llarg del projecte.

4.1. Sistema hiperespectral

El sistema hiperespectral utilitzat per a l'obtenció de la informació de les mostres està format principalment per: la càmera hiperespectral que permet l'obtenció de la informació espectral de la mostra que es vol estudiar, el sistema d'il·luminació que permet il·luminar la mostra uniformement, i el software que permet controlar tots els dispositius. A més, en tractar-se d'un sistema *pushbroom* també ha estat necessària la introducció d'un sistema de desplaçament lineal. En la **Figura 4.1** es pot observar el muntatge del sistema hiperespectral.

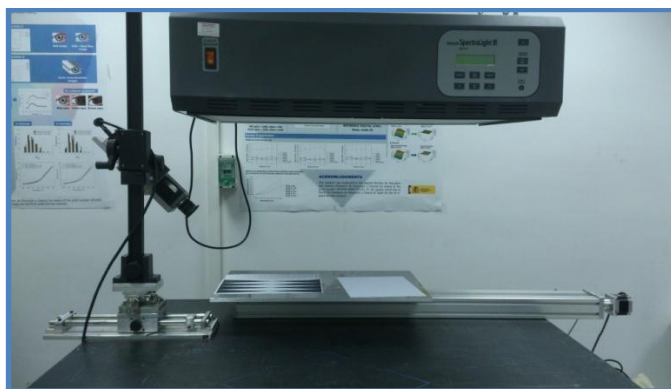


Figura 4.1 Muntatge del sistema hiperespectral format per la càmera hiperespectral, el sistema d'il·luminació i el sistema de desplaçament.

- Càmera Hiperespectral

La càmera hiperespectral està formada per l'espectrògraf ImSpector V10E que permet dispersar la llum reflectida en el rang espectral de 400 a 1000nm i amb una resolució espectral de 2,8nm, la càmera CCD monocromàtica AVT Pike F-210B que permet l'enregistrament d'imatges amb una resolució espacial de 1920(H) x 1080(V) i 14 bits de profunditat de digitalització, i l'objectiu Cosmicar Television 1.4/16 que té una focal fixa de 16mm [Figura 4.2]. Cal mencionar que la dimensió vertical de la càmera s'usa per quantificar la quantitat de llum per cada longitud d'ona que arriba de cada punt d'una línia horitzontal.

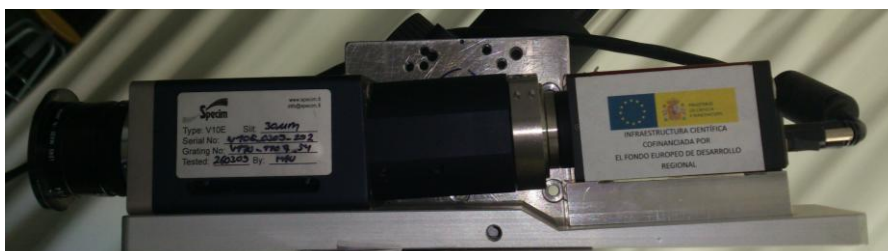


Figura 4.2 Càmera hiperespectral formada pel sensor CCD AVT Pike F-210B, per l'espectròmetre ImSpector V10E i l'objectiu Cosmicar Television 1.4/16.

- Sistema d'il·luminació

Com a sistema d'il·luminació s'ha seleccionat la cabina d'il·luminació SpectraLight III que permet realitzar una gran gama d'avaluacions colorimètriques gràcies a la simulació produïda amb làmpades halògenes de tungstè filtrades, de manera que permet una representació molt exacta de la llum de dia i produeix un camp molt uniforme. Concretament s'utilitza el model de lluminària de sostre únic SPL III que es troba penjada del sostre per 4 cadenes, permetent així modificar l'angle d'inclinació [Figura 4.3]. El sistema incorpora 6 fonts de llum seleccionables: la llum de dia D65, la llum fluorescent TL84, la llum incandescent A, el fluorescent blanc CWF, la llum natural d'horitzó i la llum ultra violeta que pot ser utilitzada individualment o combinada amb qualsevol altra de les fonts de llum ja esmentades.

En el present treball aquest sistema sempre s'ha utilitzat amb la opció de font de llum dia D65 i una inclinació de 0° respecte la mostra. Per tant també és perpendicular al sistema de desplaçament.



Figura 4.3 Sistema d'il·luminació SpectraLight III.

- Sistema de desplaçament

Per a obtenir la informació espectral en un sistema *pushbroom* és necessari desplaçar la mostra linealment. En aquest cas per a realitzar l'escaneig s'utilitza una cinta de desplaçament lineal integrada amb un motor pas a pas [Figura 4.4]. La precisió de la cinta depèn principalment de l'angle de cada pas, on en aquest sistema és de 1,8° de manera que necessita realitzar 200 passos per a completar una volta sencera (360°). Cada pas del motor implica un desplaçament de 25 micres.

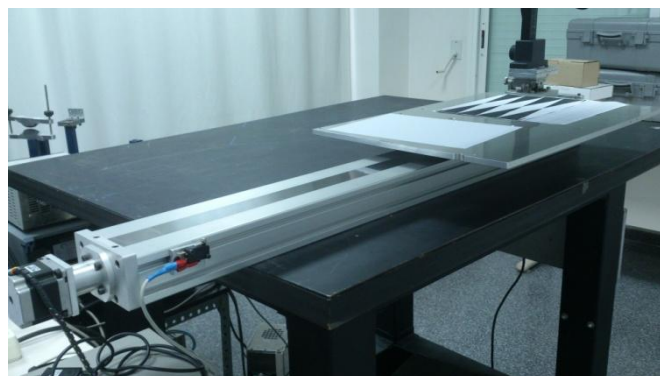


Figura 4.4 Cinta de desplaçament lineal amb motor pas a pas.

- Software de control

Per a obtenir la informació espectral d'una mostra a partir del sistema hiperspectral ha estat necessària la creació d'una aplicació informàtica per tal de controlar tant la càmera hiperspectral com el sistema de desplaçament. Per aquesta finalitat s'ha comptat amb l'ajuda d'un informàtic.

L'aplicació desenvolupada està formada per 4 pantalles: a la primera s'hi accedeix amb el menú "Setup" i permet decidir si es vol treballar amb 8 o 16 bits (dels quals només se n'aprofiten 14 ja que aquesta és la profunditat de digitalització de la càmera), modificar el guany, l'offset i el temps d'exposició de la càmera, i moure la mostra a la posició desitjada [Figura 4.5].

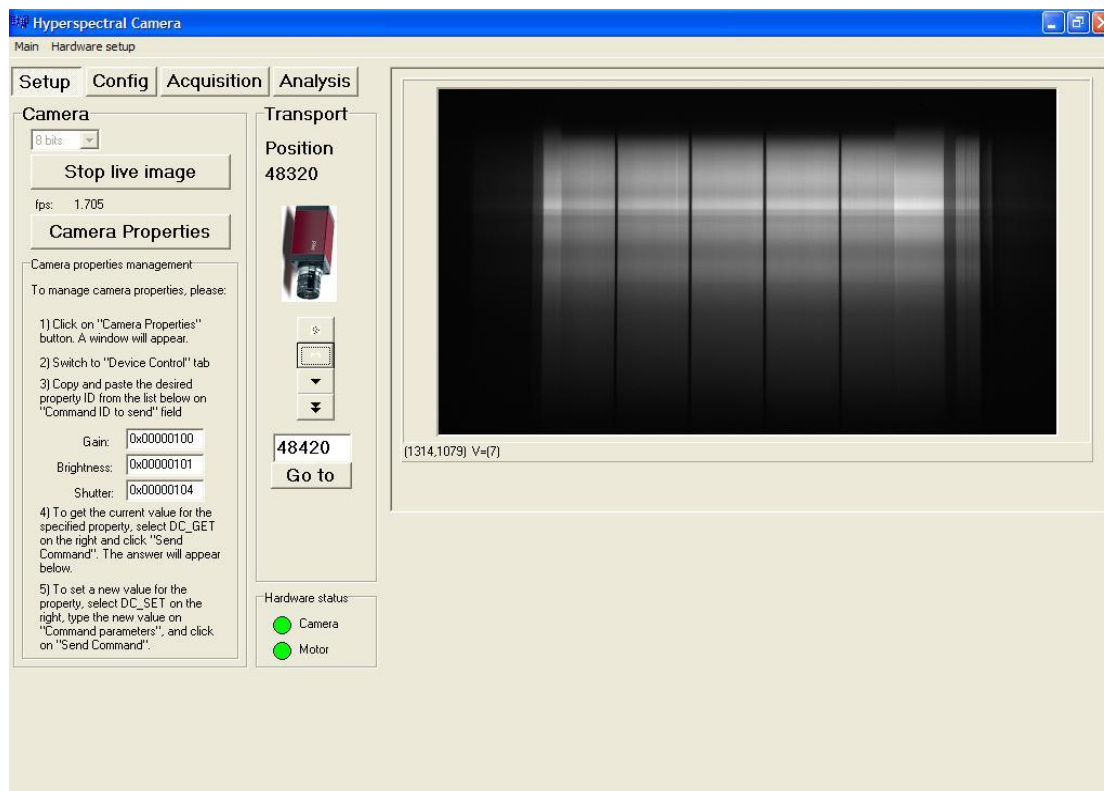


Figura 4.5 Pantalla "setup" de l'aplicació que permet modificar les característiques de la càmera i moure la mostra a la posició desitjada.

La segona pantalla, anomenada "Config" [Figura 4.6], permet decidir si es vol treballar amb nivells de gris (és el que realitza el programa per defecte) o si es vol obtenir l'espectre de reflectància de la mostra analitzada. En aquest cas el programa permet importar la imatge de corrent fosca i la imatge corresponent a un blanc patró calibrat mesurat en les mateixes condicions que la mostra. Així, per computar la reflectància s'utilitza la fórmula següent:

$$r(i, j) = \frac{ND(i, j) - ND_f(i, j)}{ND_w(i, j) - ND_f(i, j)} \times cal_w \quad (4.1)$$

On $r(i, j)$ és la reflectància, $ND(i, j)$ el nivell de gris de la imatge de la mostra analitzada, $ND_f(i, j)$ el nivell de gris de la imatge de corrent fosca, $ND_w(i, j)$ el nivell de gris de la imatge del blanc calibrat, avaluats en el píxel (i, j) . cal_w és el valor de calibratge del blanc proporcionat pel fabricant per cadascuna de les longituds d'ona. Cal recordar que en la dimensió vertical de la càmera (columnes), cada píxel codifica una longitud d'ona específica.

Finalment, aquesta pantalla permet també eliminar els *hot-pixels* presents a la càmera, el valor dels quals es substitueix per la mitjana del valor dels nivells de gris dels píxels veïns.

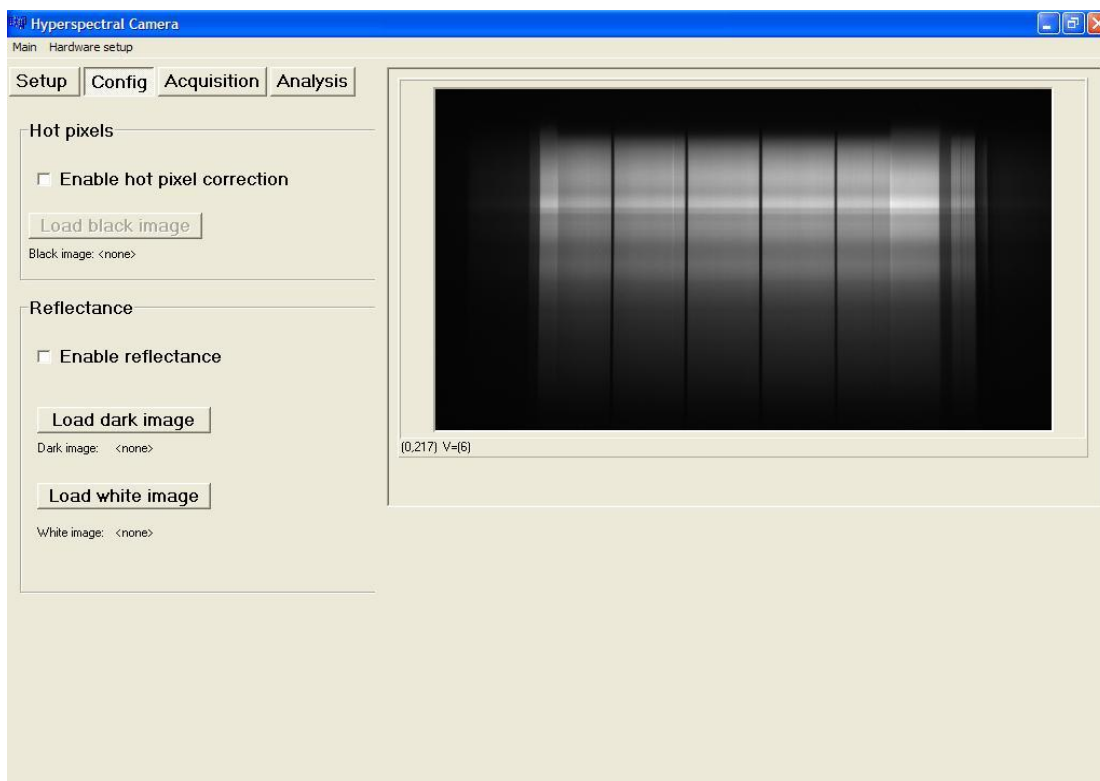


Figura 4.6 Pantalla “config” que permet el.liminar els hotpíxels i seleccionar el mode de treball de la càmera: amb ND o reflectàncies.

En la pantalla “Acquisition” es poden decidir les posicions d’inici i final del sistema de desplaçament lineal en les que es volen fer les captures i l’increment de passos que ha de realitzar la plataforma [Figura 4.7].

En l’última pantalla “Analysis” hi ha dues pestanyes: la primera permet seleccionar un punt o una àrea de la mostra adquirida ja sigui gràficament o escrivint les coordenades de la ROI (*Region of Interest*) [Figura 4.8]; la segona pestanya permet la visualització del perfil espectral de l’àrea o píxel seleccionat amb anterioritat. Si s’ha seleccionat una àrea et presenta els valors corresponents a la mitjana. A més, el programa pot realitzar un binning (amitjanat) de 2, 3, 4, 5 o 6 píxels en la direcció vertical, de manera que si es fa això la resolució espectral del sistema disminueix però alhora millora el soroll [Figura 4.9]. Aquesta darrera opció és vàlida per mostres molt fosques.

Les imatges capturades de la mostra es guarden en format .raw. Per a cada captura s’obtenen dues imatges, una primera sense processar i una segona processada amb la correcció dels hotpíxels, si aquesta opció ha estat habilitada. A més, els arxius que contenen la informació de la reflectància per a cada píxel i el del perfil espectral de l’àrea seleccionada de la imatge en nivells de gris són exportables al programa Microsoft Excel.

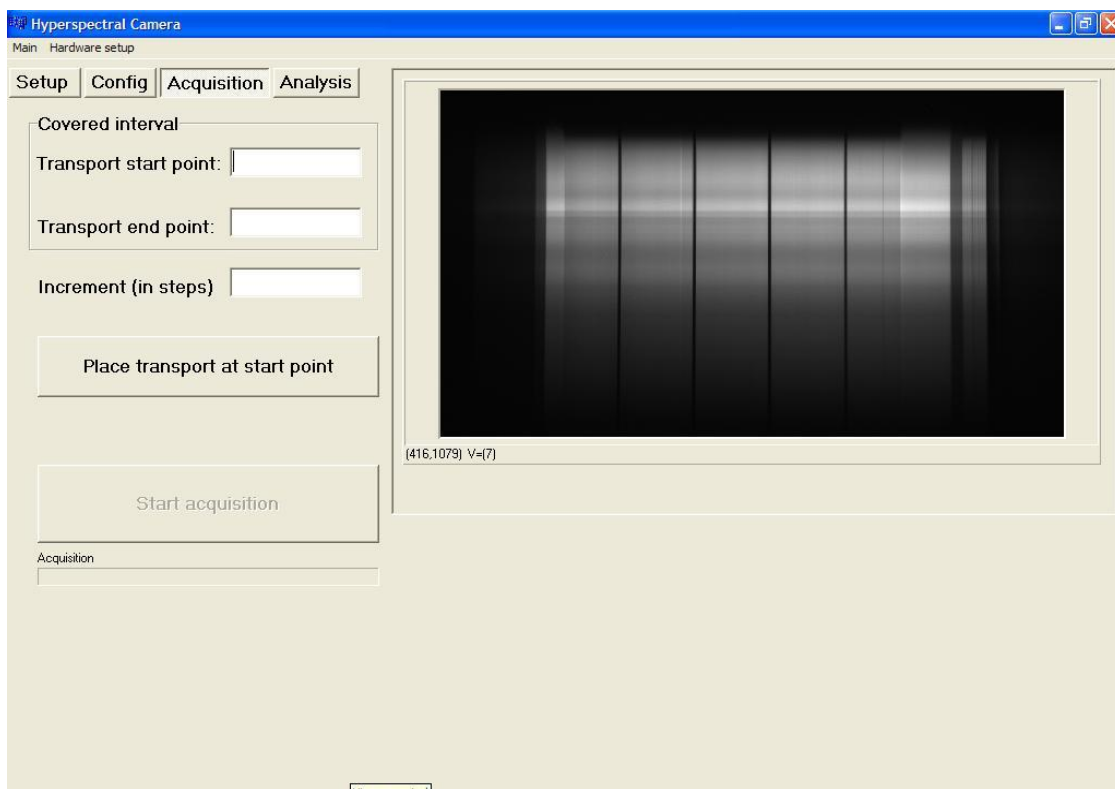


Figura 4.7 Pantalla "Acquisition" que permet decidir la posició d'inici i final en que es volen realitzar les mesures i l'interval de passos entre cada una de les captures.

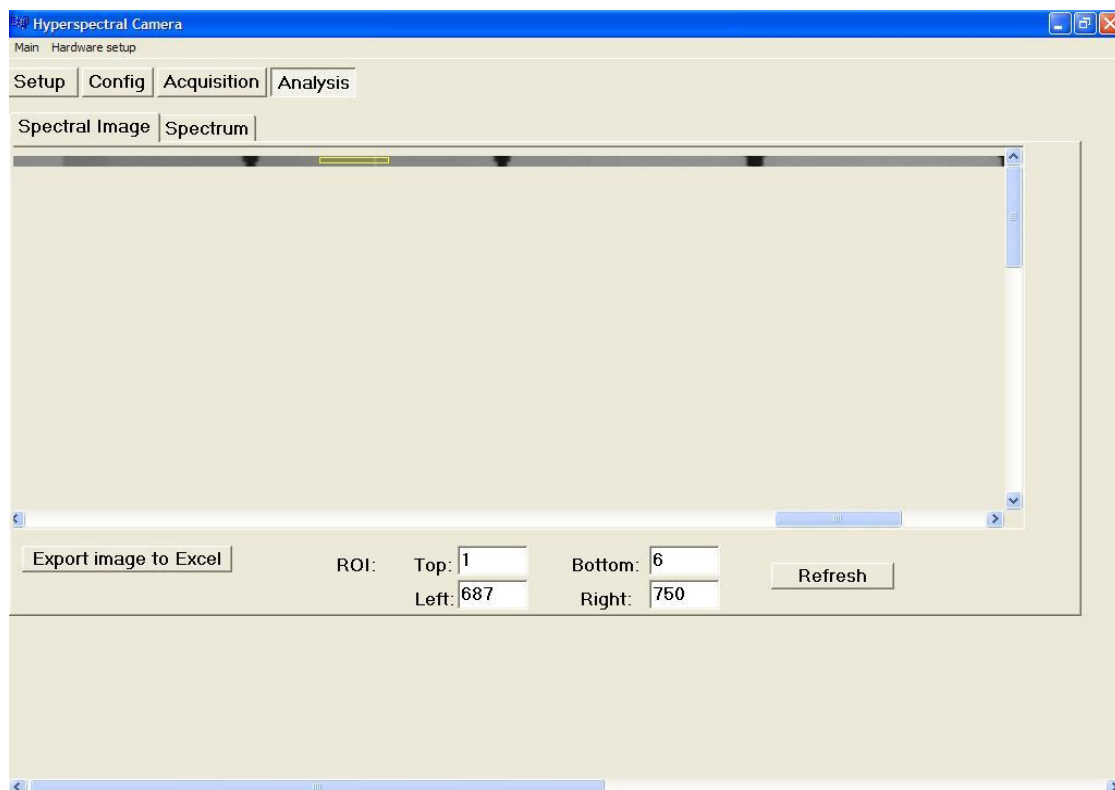


Figura 4.8 Primera pestanya del botó "Analysis" on es pot seleccionar l'àrea o píxel d'interès en que es vol treballar.

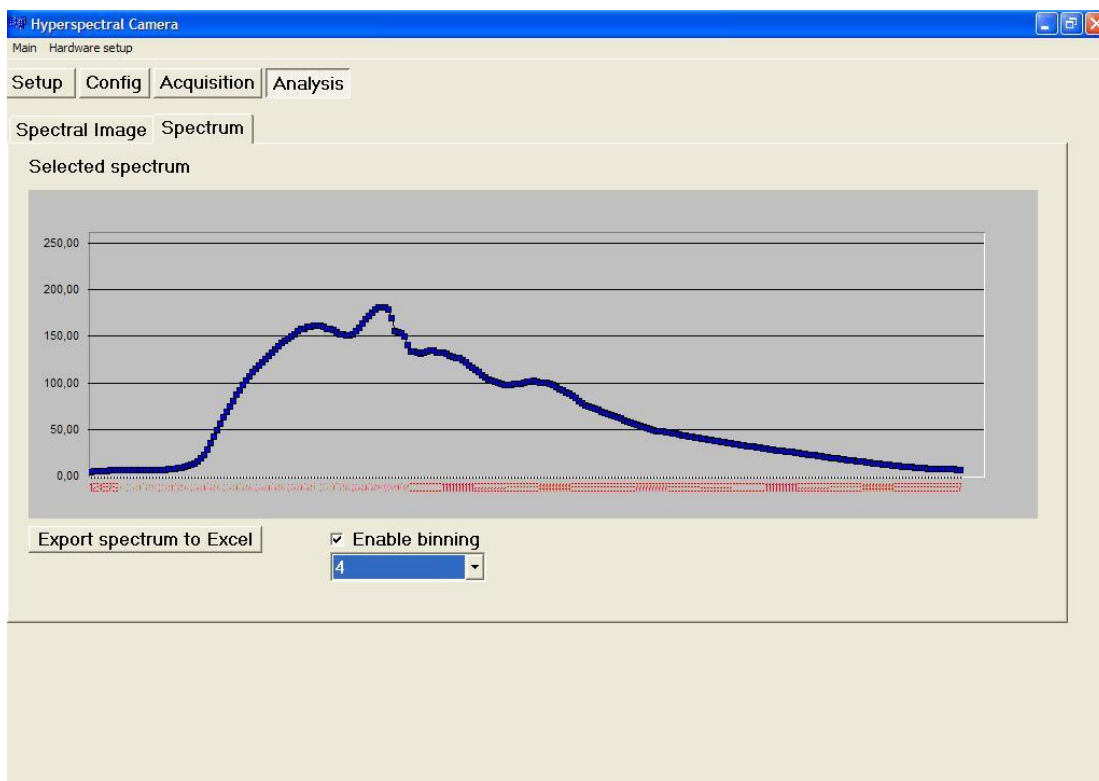


Figura 4.9 Segona pestanya del botó “Analysis” que permet observar el perfil espectral de l'àrea seleccionada amb anterioritat (en nivells de gris) i establir si es vol el binning en 2, 3, 4, 5 o 6 píxels.

4.2. Instrumentació complementària

Durant la realització dels treballs ha estat necessària la utilització d'altres instruments que no pertanyen pròpiament al sistema hiperespectral. A continuació es descriuen.

- Photo Research PR-655 SpectraScan® Spectroradiometer

Per a comprovar la reproductibilitat del sistema hiperespectral s'ha utilitzat l'espectrofotòmetre Photo Research (PR-655) com a equip de referència. Aquest permet realitzar mesures de reflectància de forma ràpida amb l'ajuda d'una matriu de fotodiodes. El seu rang espectral comprèn l'espectre visible (380 a 780 nm) amb una resolució de 4 nm [Figura 4.10].



Figura 4.10 Espectrofotòmetre Photo Research (PR-655).

- Font de llum de Mercuri i Argó (Ocean Optics Inc. HG-1 Mercury Argon Calibration Source)

Es tracta d'una font de llum calibrada de mercuri i argó que conté una gran quantitat de pics espectrals molt estrets en el seu espectre d'emissió. Aquests pics permeten realitzar el calibratge de les longituds d'ona d'un sistema espectromètric, com és el sistema hiperespectral, en els rangs de l'ultraviolat, del visible i l'infraroig proper (253 a 1700 nm) [Figura 4.11].

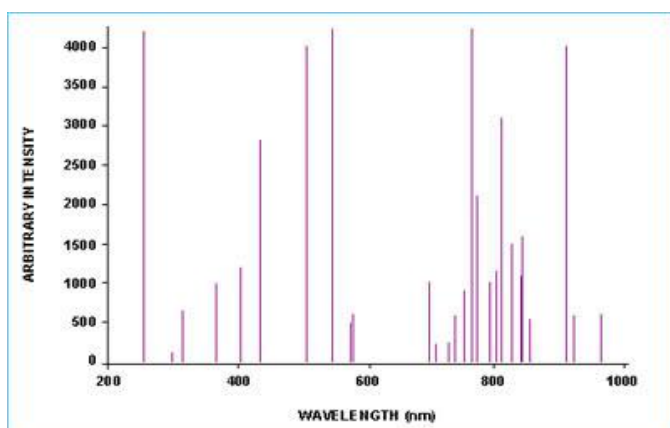


Figura 4.11 A la dreta font de llum de Mercuri i Argó HG-1. A i a l'esquerre el seu espectre d'emissió.

- Carta de colors X-Rite Munsell CCR ColorChecker® Classic chart

La carta de colors ColorChecker (CCR) és una carta (209 x 279 mm) amb 24 mostres que comprèn colors naturals, cromàtics, primaris i neutres disposats en quatre files i sis columnes, científicament escollits per cobrir una ampla gamma de colors [Figura 4.12]. D'aquesta manera pot ser utilitzat en una gran gama d'aplicacions: en fotografia digital i convencional per a revisions d'imatges, correcció de colors i balanç de blanc; en arts gràfiques per a la revisió de processos de prova en pantalla; en cinematografia, entre d'altres.

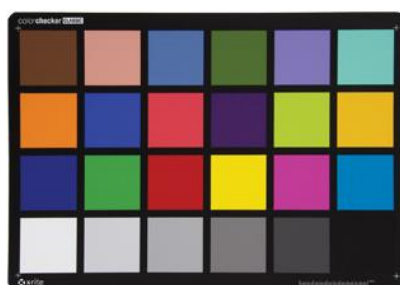


Figura 4.12 Carta de colors ColorChecker® Classic Chart.

- Gigahertz-Optik GmbH BN-R98-SQ12

El blanc patró calibrat (Gigahertz) és un estàndard de reflectància (254x254 mm) que permet calibrar i/o ajustar sistemes de mesura òptica. Concretament aquest patró està construït amb el material PTFE. Aquest material és de llarga duració i és estable amb la temperatura, té una reflectància difosa òptima (lambertià) i la seva reflectància és de $98 \pm 1\%$ de 400 a 800 nm [Figura 4.13].

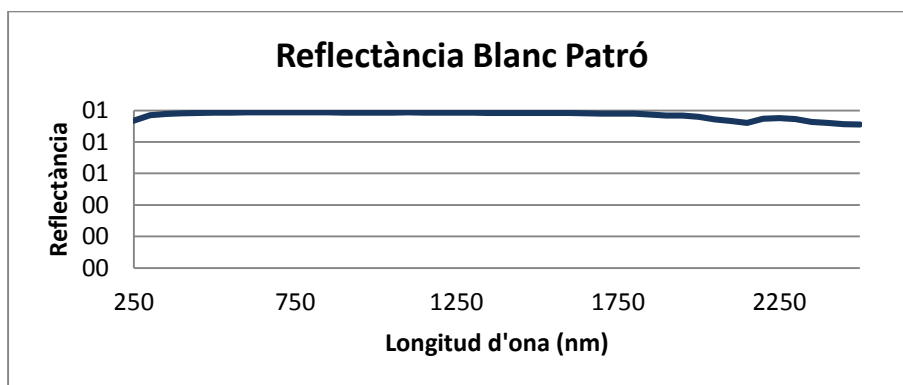


Figura 4.13 Gràfica de la reflectància del blanc patró calibrat Gigahertz-Optik GmbH BN-R98-SQ12.

5. METODOLOGIA

A continuació es presenta la metodologia emprada per a assolir els objectius establerts en el treball. D'aquesta manera aquest capítol consta de cinc apartats: en el primer s'exposa el procés seguit per avaluar l'estabilitat de l'emissió de la làmpada utilitzada i en el segon es mostra el procediment utilitzat per estudiar la linealitat en la resposta de la càmera. Una vegada verificats els dos punts anteriors ja es pot procedir amb el calibratge del sistema hiperespectral, detallat en el tercer apartat. Finalment, els dos últims apartats exposen la repetibilitat i la reproductibilitat del sistema, respectivament.

Com a apunt previ als aspectes anteriors cal mencionar que tots els càlculs colorimètrics que s'han fet en el present treball han estat realitzats amb l'il·luminant D65, amb l'observador patró de 2º CIE 1931 i en el rang de l'espectre visible de 400 a 700 nm amb un increment de longitud d'ona de 4nm. A més, s'utilitza la geometria de mesura D/45 (Angle il·luminació difosa/ Angle observació 45º), és a dir, amb una inclinació de la càmera de 45º respecte la mostra [Figura 5.1].

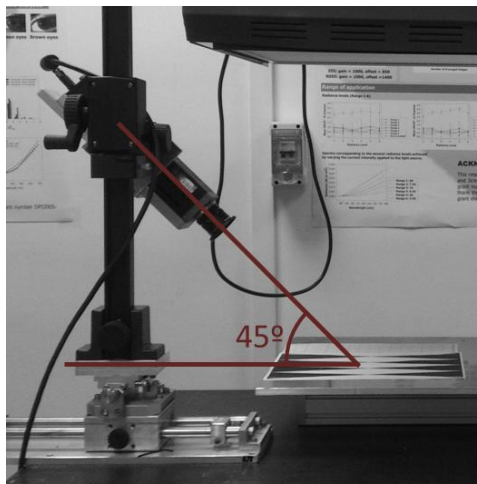


Figura 5.1 Geometria D45 del sistema hiperespectral.

5.1. Estabilitat en l'emissió del sistema d'il·luminació

El primer factor que s'ha de controlar sempre quan es treballa amb un sistema per a la mesura de llum és l'estabilitat de la font que s'utilitzarà. Una font lluminosa es considera estable quan després de cert temps d'haver-la posat en funcionament la seva luminància, o equivalentment la seva radiància, són constants, permetent així la minimització de les diferències en mesures que difereixen en el temps. Per establir el temps que necessita la font per a arribar a aquesta estabilitat és necessària la mesura de la radiància i/o luminància cada cert temps amb l'ajuda d'un radiòmetre o fotòmetre.

En el nostre cas, per a caracteritzar l'estabilitat en l'emissió del sistema d'il·luminació (SpectralLight III) s'ha mesurat la luminància i la radiància cada 10 segons durant un cert interval de temps amb l'espectròmetre PR-655 i s'ha determinat el temps necessari que cal esperar abans de començar les mesures per assegurar que la seva emissió sigui estable.

5.2. Linealitat en la resposta de la càmera

Per a saber si una càmera pot ser utilitzada amb finalitats metrològiques, concretament en fotometria i colorimetria, és imprescindible comprovar el rang en el qual aquesta presenta una resposta lineal. És a dir, s'ha de verificar que la resposta en nivells de gris varia de manera lineal amb la quantitat de llum que arriba al sensor. Així, en aquest treball s'han mesurat els nivells de gris corresponents a diferents temps d'exposició (fixats uns paràmetres de guany i offset) i s'ha verificat la relació existent entre ambdues variables.

Donat que el rang per treball escollit per al sistema hiperespectral és l'espectre visible comprès entre 400 i 700nm, per a verificar la linealitat en la resposta de la càmera hiperespectral s'han seleccionat els píxels corresponents a les longituds d'ona de 450, 550 i 650 nm. Per a realitzar aquestes mesures s'ha utilitzat el blanc patró calibrat (Gigahertz). El temps d'exposició ha estat de 5.000 a 750.000 μ s.

5.3. Calibratge del sistema

Segons l'estàndard ASTM E2214-08 "Especificació i verificació del funcionament d'instruments per a la mesura del color" [ASTM, 2011] és necessari conèixer les característiques de l'instrument per a poder comparar i/o verificar que aquest funciona adequadament. Es recomana calibrar els sistemes espectrofotomètrics, en el nostre cas el sistema hiperespectral, tant espectralment com radiomètricament. En el primer cas es determina l'escala de longitud d'ona associada a l'instrument, que proporciona valors en píxels i no en nanòmetres. En el segon cas s'avalua l'equivalència entre valors de reflectància i nivells de gris. Tant el calibratge espectral com radiomètric es realitzen per comparació amb patrons traçables.

5.3.1. Calibratge espectral

El calibratge espectral consisteix en determinar la longitud d'ona corresponent a cada píxel vertical de la càmera. Cal recordar que en el sistema hiperespectral els píxels continguts en una columna (1080) s'utilitzen per quantificar la quantitat de llum que arriba de cada longitud d'ona, gràcies a un espectrògraf situat enfront de la càmera. Alhora, la dimensió horitzontal (1920 píxels) s'utilitza per captar una línia de la mostra. Així doncs cal determinar l'equivalència de cada píxel vertical una amb la longitud d'ona (nm).

Per a realitzar aquesta determinació s'ha mesurat amb la càmera hiperespectral la font de Mercuri i Argó, ja que conté diversos pics espectrals molt estrets entre 253 i 922 nm [Figura 5.2]. S'han localitzat cada un dels pics en termes de píxels per a posteriorment assignar-los als valors de longitud d'ona proporcionats pel fabricant de la làmpada. Una vegada realitzades aquestes mesures s'ha portat a terme una regressió lineal entre longitud d'ona i número de píxel, obtenint així una funció de calibratge que permet calcular la longitud d'ona assignada a cada píxel. La norma ASTM E2214-08 defineix la precisió espectral com la diferència entre la longitud d'ona real i la longitud d'ona calculada. Seguint aquestes indicacions s'ha establert doncs la precisió espectral del sistema hiperespectral utilitzant els pics de la làmpada compresos entre 400 i 700nm, que és el rang de treball seleccionat pel sistema.

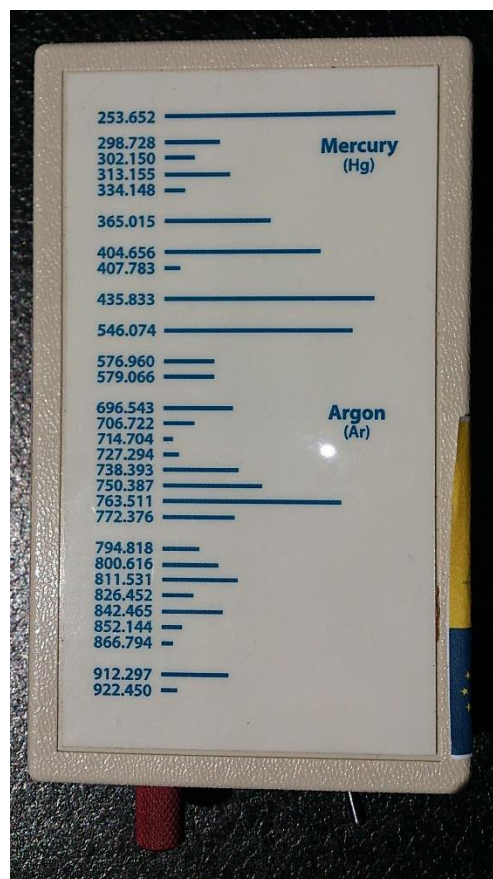


Figura 5.2 Pics espectrals de la Font de Hg-Ar proporcionats pel fabricant.

5.3.2. Calibratge radiomètric

El calibratge radiomètric s'analitza mitjançant tres factors segons l'estàndard ASTM E2214-08: el nivell de blanc, el nivell de negre i la linealitat del sistema.

La precisió del nivell de blanc es determina comparant la reflectància proporcionada pel sistema sota estudi amb la reflectància donada per un patró blanc calibrat. En aquest treball s'ha obtingut per comparació directa amb el patró estàndard de reflectància (Gigahertz). Específicament s'ha calculat la diferència entre els valors reals del patró de reflectància (calibratge cedit pel fabricant) amb els valors mesurats amb el sistema en les longituds d'ona de 450, 550 i 650 nm, donat que aquestes són una bona representació del rang de treball utilitzat.

Per la seva banda, la precisió del nivell de negre fa referència a la mesura que s'obté amb el sistema hiperspectral quan es tapa l'objectiu. És a dir, és una manera de quantificar la reflectància de fons deguda a la corrent fosca de la càmera, reflexos interns del sistema etc. En aquest treball s'ha obtingut mesurant la reflectància de la càmera hiperspectral amb l'objectiu tapat i considerant altra vegada les longituds d'ona de 450, 550 i 650 nm. Normalment es considera que un valor inferior a 0,0005 és desitjable per obtenir bones mesures de color.

Per últim, la linealitat del sistema hiperspectral s'ha estudiat amb l'ajuda dels 6 colors neutres de la carta de color CCCR (blanc, gris clar, gris clar-mig, gris mig, gris fosc i negre), els factors de luminància (Y) dels quals venen donats pel fabricant. També seguint les indicacions de la mateixa normativa ASTM E2214-08, s'han calculat les rectes de regressió entre els valors de factor de luminància reals i els mesurats amb el sistema hiperspectral pels colors neutres citats, considerant cada recta de regressió

entre parells de mostres independentment. Segons la normativa, les pendents trobades mitjançant la regressió han de ser molt properes al valor 1,0 si el sistema té una bona resposta fotomètrica. En aquest cas cal mencionar que els factors de luminància de les 6 mostres (Y) han estat calculats amb el il·luminant CIE C en comptes del D65 utilitzat a la resta del treball, ja que els valors donats pel fabricant han estat obtinguts amb aquestes característiques.

5.4. Repetibilitat del sistema

Basant-se en la definició establerta per la norma ASTM E3314-08, la repetibilitat d'un sistema es basa en quantificar com un instrument és capaç de repetir les mesures d'una mateixa mostra en diferents períodes de temps ja siguin minuts, hores, dies o setmanes. Per garantir una bona repetibilitat del sistema analitzat, les diferències entre mesures han de ser el més petites possibles. En aquest treball s'han portat a terme repeticions de mesures de reflectància del blanc patró calibrat (Gigahertz). S'han realitzat mesures durant 2,5 hores, a intervals de 15 minuts, obtenint un total de 10 mesures. Per quantificar la repetibilitat del sistema s'ha calculat la mitjana aritmètica dels 10 espectres de reflectància mesurats i posteriorment s'han computat les desviacions de color entre aquesta mesura i cadascuna de les mesures realitzades. Les desviacions de color s'han quantificat amb els paràmetres següents: ΔE_{ab} , ΔE_{94} , ΔE_{00} , GFC, IRE, CSCM, RMSE i wRMSE.

5.5. Reproductibilitat del sistema

Segons la norma ASTM E3314-08, la reproductibilitat d'un sistema fa referència a una forma de repetibilitat en la qual un o més paràmetres de mesura han canviat, per exemple, l'instrument. Així doncs, en aquest treball es porta a terme l'estudi de la reproductibilitat del sistema mitjançant la comparació de les seves mesures amb les d'un altre instrument espectrofotomètric i avaluant la seva similitud.

Concretament, per a establir la reproductibilitat del sistema hiperespectral s'han mesurat els espectres de reflectància de diverses mostres de la carta de colors CCCR mitjançant el mateix, concretament les mostres catalogades com verd, magenta, groc i els 6 colors neutres. La reflectància de les mostres també s'ha quantificat mitjançant l'espectrofotòmetre comercial PR-655 utilitzant la mateixa geometria de mesura (D/45). Posteriorment s'han calculat les desviacions de color entre les mesures realitzades per cada equip mitjançant els següents paràmetres: ΔE_{ab} , ΔE_{94} , ΔE_{00} , GFC, IRE, CSCM, RMSE i wRMSE .

6. RESULTATS I DISCUSSIÓ

En aquest apartat es mostraran els resultats obtinguts durant el desenvolupament del projecte, seguint la mateixa estructura que l'exposada en el capítol anterior.

6.1. Estabilitat en l'emissió del sistema d'il·luminació

Els resultats obtinguts de luminància i radiància mesurats en funció del temps amb l'espectrofotòmetre convencional PR-655 es mostren a la Figura 6.1 i la Figura 6.2, respectivament. A la vista dels resultats s'ha establert que la làmpada es pot considerar estable a partir de 1,65 minuts aproximadament. A partir d'aquest valor els percentatges de variació màxims mesurats en termes de luminància i radiància són d'un 0,14% i 0,06%, respectivament [Taula 6.1]. D'aquesta manera, sempre s'ha procedit a esperar un mínim de dos minuts abans de realitzar cap mesura amb el sistema hiperspectral.

	Màxim $t \geq 1,65'$	Mitjana	Increment màxim	Variació (%)
Luminància	629,800	627,800	0,863	0,137
Radiància	3,199	3,197	0,002	0,063

Taula 6.1 Valors de luminància i radiància. S'especifiquen els següents valors: valor màxim obtingut després de 1,65 minuts, mitjana corresponent a tots els temps a partir de l'estabilització de la làmpada, increment entre els dos valors anteriors i percentatge de variació corresponent.

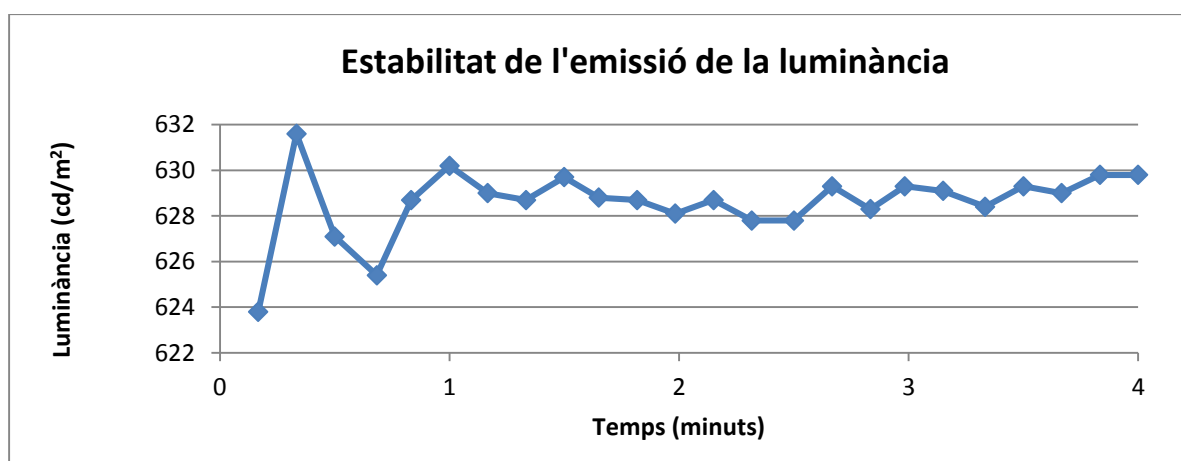


Figura 6.1 Gràfica d'estabilitat de l'emissió de la luminància.

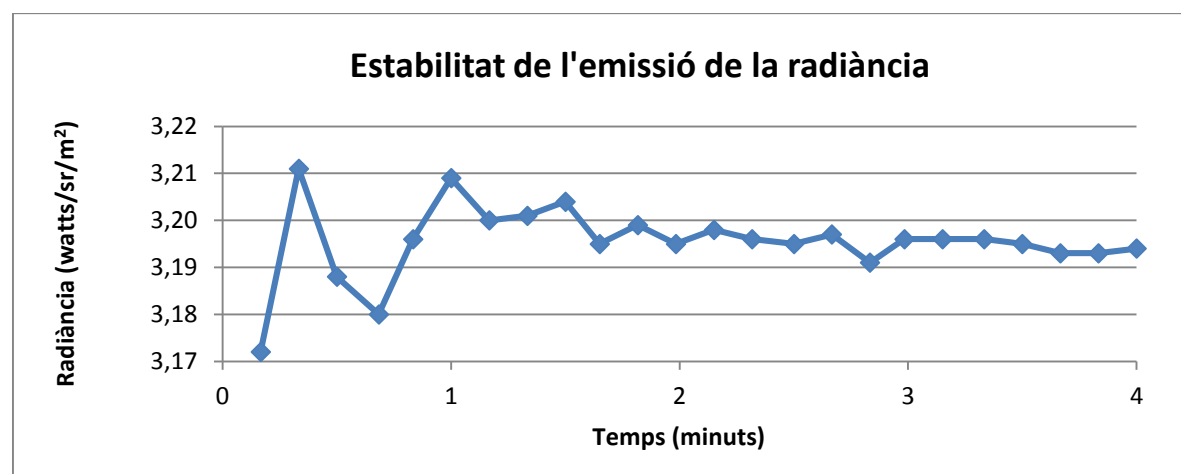


Figura 6.2 Gràfica d'estabilitat de l'emissió de la radiància.

6.2. Linealitat en la resposta de la càmera

En la **Figura 6.3** i en la **Figura 6.4** es mostren les gràfiques de nivell de gris en funció del temps d'exposició tant per 8 bits com per 14 bits. A la **Taula 6.2** es detallen els resultats obtinguts. Els paràmetres de guany i offset s'han fixat en ambdós a un valor de 75 en tots els casos. Tal i com s'ha explicat en el capítol de metodologia, la linealitat s'ha estudiat per a les longituds d'ona de 450, 550 i 650 nm (l'equivalència píxel-longitud d'ona es descriurà a l'apartat següent). A la vista dels resultats es pot afirmar que la càmera presenta una resposta lineal tant amb 8 bits com a 14 bits en el rang de l'espectre visible escollit comprès entre 400 i 700 nm. Per obtenir una bona mesura amb el sistema hiperespectral només caldrà verificar que la resposta del sistema no està saturada, i que és inferior a 255 o 16384 en tots els píxels, quan es treballa amb 8 i 14 bits respectivament.

Temps exposició (μ s)	8 bits			14 bits		
	450 nm	550 nm	650 nm	450 nm	550 nm	650 nm
5.000	6,5333	7,9000	6,4000	427,2745	569,5686	480,2156
25.000	14,7532	25,4091	16,9805	950,3137	1645,0196	1136,7451
50.000	26,0862	45,0172	29,1724	1636,8039	2895,2744	1978,6471
75.000	37,0143	64,6429	40,9571	2283,0000	4155,5883	2760,4509
100.000	47,0968	84,5484	53,3871	2978,4118	5372,2939	3535,7058
150.000	68,4571	123,7857	77,4571	4276,8823	7856,7060	5111,6665
200.000	89,6716	163,9627	101,1119	5565,1176	10428,1963	6677,4116
250.000	110,3182	204,0455	125,7727	6888,1397	12799,0977	8186,3139
300.000	131,4865	241,2703	149,2703	8193,5878	16376,1572	9791,3720
325.000	141,9067	255,0000	161,3467	9540,2744	16383,0000	11355,4512
350.000	153,6061	255,0000	173,1515	10804,7257	16383,0000	12872,5293
400.000	173,8099	255,0000	195,8732	13350,7842	16383,0000	14432,3525
450.000	194,6098	255,0000	217,9512	14653,0195	16383,0000	15933,8828
500.000	215,3137	255,0000	240,7843	15973,2158	16383,0000	16383,0000
550.000	236,2632	255,0000	255,0000	16383,0000	16383,0000	16383,0000
600.000	254,7935	255,0000	255,0000	16383,0000	16383,0000	16383,0000
650.000	255,0000	255,0000	255,0000	16383,0000	16383,0000	16383,0000
700.000	255,0000	255,0000	255,0000	16383,0000	16383,0000	16383,0000
750.000	255,0000	255,0000	255,0000	16383,0000	16383,0000	16383,0000

Taula 6.2 Valors del nivell de gris al canviar el temps d'exposició a 8 i 14 bits.

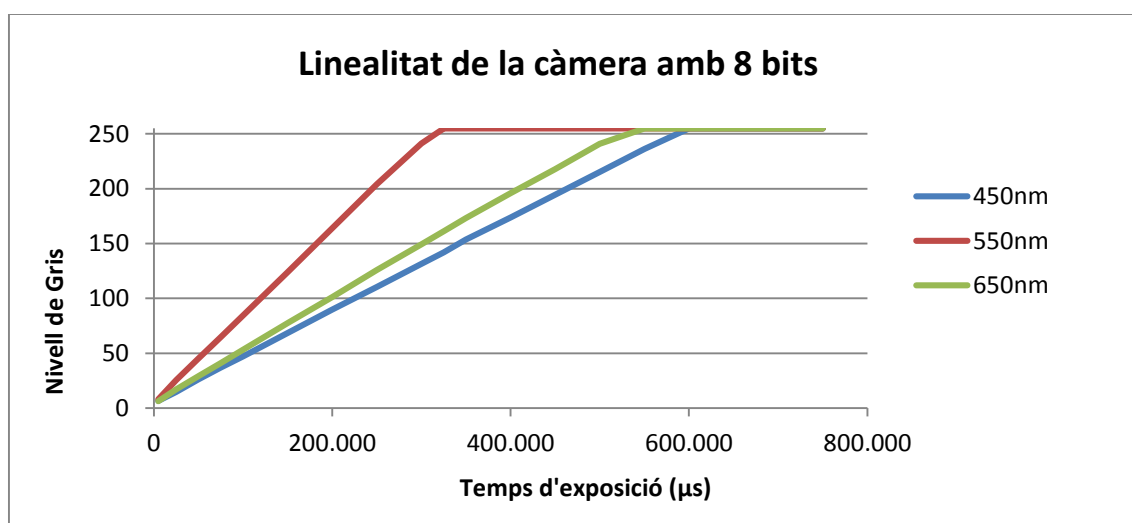


Figura 6.3 Gràfica per a la comprovació de la linealitat de la càmera amb 8 bits.

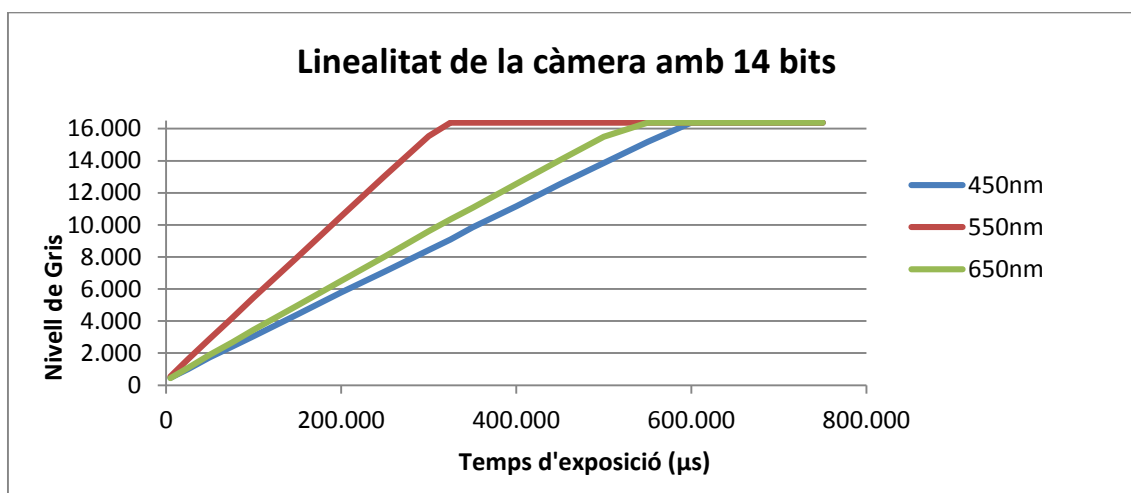


Figura 6.4 Gràfica per a la comprovació de la linealitat de la càmera amb 14 bits.

6.3. Calibratge del sistema

6.3.1. Calibratge espectral

Tal i com s'ha detallat en el capítol anterior, per a realitzar el calibratge espectral s'ha mesurat l'espectre de la font de Mercuri i Argó amb la càmera hiperespectral i s'han localitzat tots els pics de la làmpada en termes de píxels. Això s'ha fet establint els píxels que presentaven un màxim en el nivell de gris. Recordem que hi ha 1080 píxels en cada columna. La posició en nanòmetres de cadascun dels pics de la font els proporciona el fabricant, com ja s'ha dit anteriorment. Amb aquests conjunts de dades s'ha procedit a buscar la relació existent entre el número de píxel i la longitud d'ona [Taula 6.3].

Pic (λ proporcionada pel fabricant en (nm))	Píxel corresponent
365,015	75
404,656	136
435,833	183
546,074	342
578,013	387
696,543	551
706,722	566
714,704	578
727,294	593
738,393	608
750,387	626
763,511	642
772,376	656
794,818	686
800,616	694
811,531	708
826,452	729
842,465	749
852,144	764
866,794	784
912,297	845
922,450	859

Taula 6.3 Relació dels pics donats pel fabricant de la font de Mercuri i Argó amb el píxels corresponent de la càmera.

Tal i com es pot observar a la **Figura 6.5**, la relació entre píxels i longituds d'ona és lineal. És per això que s'ha procedit a calcular la recta de regressió existent per a trobar la relació entre el número de píxel i la longitud d'ona en nm, i poder així interpolar el valor de la longitud d'ona dels píxels no corresponents a cap pic de la làmpada. Concretament, el pas de longitud d'ona existent entre dos píxels consecutius és de 0,716. Cal mencionar que probablement es podria obtenir una precisió espectral lleugerament superior realitzant una regressió de segon ordre, és a dir, no lineal.

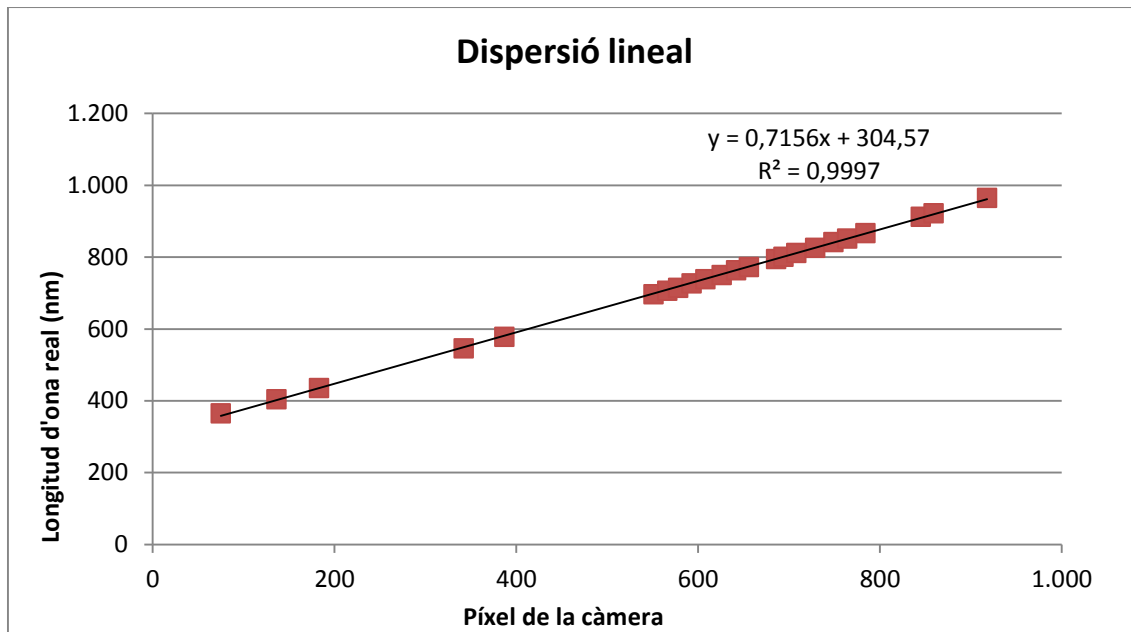


Figura 6.5 Relació entre els píxels de la càmera i la longitud d'ona.

S'ha de tenir en compte que de tots els pics espectrals els que realment interessin són els que es troben entre 400 i 700 nm, ja que aquest és el rang espectral que hem tingut en compte en aquest treball. A més, donat que el sensor de la càmera CCD no pot distingir entre els pics de 576,960 i 579,066 a causa de ser molt propers entre ells, s'ha utilitzat la mitjana aritmètica dels valors d'ambdós donats pel fabricant (578,013 nm) i aquest s'ha assignat al pic màxim donat pel sistema [**Figura 6.6**]. En la **Taula 6.4** es mostra la precisió espectral per a aquests pics, és a dir, la diferència entre el valor de longitud d'ona calculada amb el sistema hiperespectral i la proporcionada pel fabricant. Es pot comprovar que la diferència màxima obtinguda és de 3,5 nm. S'ha de tenir en compte que la resolució espectral del sistema segons el fabricant és de 2,8 nm.

Longitud d'ona Real (nm)	Longitud d'ona Calculada (nm)	Precisió de la Longitud d'ona (nm)
404,656	401,898	2,758
435,833	435,532	0,301
546,074	549,314	3,240
578,013	581,517	3,504
696,543	698,877	2,334

Taula 6.4 Resultats de la precisió del calibratge espectral

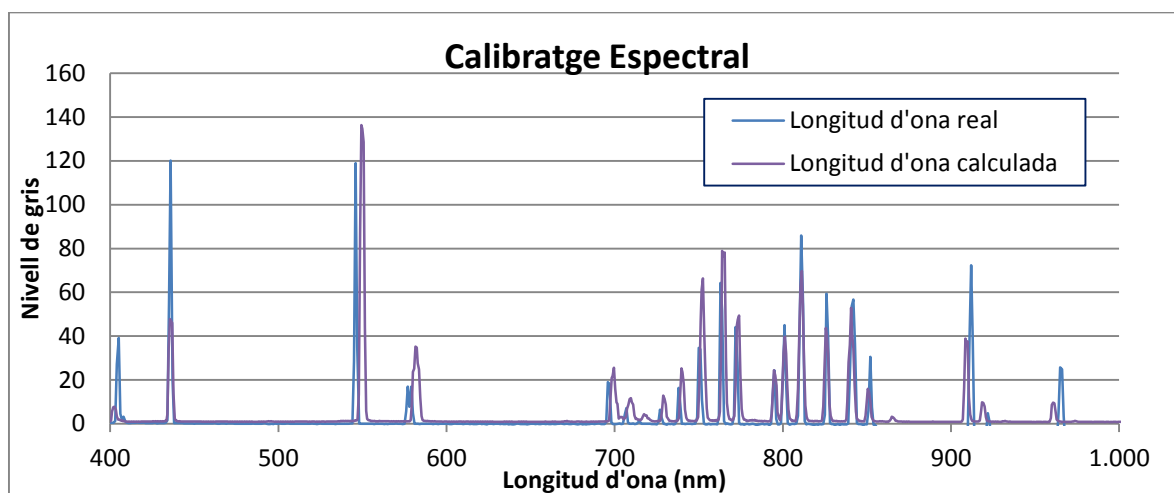


Figura 6.6 Pics de la làmpada de Mercuri i Argó proporcionats pel fabricant (Longitud d'ona real) i calculats a partir dels píxels de la càmera mitjançant la regressió lineal (Longitud d'ona calculada).

6.3.2. Calibratge radiomètric

Tal i com s'ha comentat en el capítol de metodologia, la precisió en l'escala radiomètrica involucra la mesura de tres aspectes: la mesura de la reflectància del nivell de blanc, del nivell de negre i la linealitat del sistema.

A la Taula 6.5 es presenten els resultats de reflectància corresponents al nivell de blanc per les longituds d'ona de 450, 550 i 650 nm mesurats amb el sistema hiperespectral i proporcionats pel fabricant del blanc patró, així com la seva diferència, que d'acord amb la norma ASTM E2214-08 és la precisió radiomètrica del nivell de blanc, que com es pot observar es sempre inferior a 1%.

Per la seva banda els resultats de reflectància del nivell de negre es troben en la Taula 6.6. Només en el cas de 650 nm s'obté un valor major a 0,0005 quan s'utilitzen 14 bits. Cal mencionar que la precisió radiomètrica mesurada és similar en utilitzar 8 i 14 bits. Això pot ser degut a que la variabilitat pròpia de les mesures (estabilitat de la làmpada, posicionat del sistema i de les mostres, llum paràsita etc.) sigui superior al soroll de digitalització de la càmera.

Finalment, en la Taula 6.7, en la Figura 6.7 i en la Figura 6.8 es mostren els resultats de l'estudi de la linealitat fotomètrica que és una part del calibratge radiomètric d'acord amb la norma ASTM E2214-08 del sistema. En les gràfiques es relacionen els factors de luminància (Y) de les mostres neutres corresponents a la carta de colors CCCR, mesurats amb el sistema hiperespectral i proporcionats pel fabricant. Com es pot desprendre dels resultats obtinguts, les pendents trobades tant per 8 com per 14 bits són molt properes a 1, el que indica el bon funcionament del sistema pel que fa a la quantificació de la reflectància.

	Longitud d'ona (nm)	Reflectància Blanc Patró	Reflectància Mesurada	Precisió Radiomètrica
8 bits	450	0,9842	0,9790	0,0052
	550	0,9863	0,9874	0,0011
	650	0,9874	0,9890	0,0016
14 bits	450	0,9842	0,9817	0,0025
	550	0,9863	0,9911	0,0048
	650	0,9874	0,9945	0,0071

Taula 6.5 Precisió radiomètrica corresponent al nivell de blanc del sistema hiperespectral.

	Longitud d'ona	Reflectància Mesurada
8 bits	450	0,0003
	550	0,0002
	650	0,0003
14 bits	450	0,0002
	550	0,0003
	650	0,0010

Taula 6.6 Precisió radiomètrica corresponent al nivell de negre del sistema hiperespectral.

	Segment	Pendent Mesurada	Pendent Acceptada	Diferència Absoluta	Diferència (%)
8 bits	1	1,0523	1	0,0523	5,23
	2	0,9767	1	0,0233	2,33
	3	0,9378	1	0,0622	6,22
	4	0,9567	1	0,0433	4,33
	5	0,9641	1	0,0359	3,59
14 bits	1	1,0552	1	0,0552	5,52
	2	0,9673	1	0,0327	3,27
	3	0,9310	1	0,0690	6,90
	4	0,9797	1	0,0203	2,03
	5	0,9306	1	0,0694	6,94

Taula 6.7 Pendents de les línies de regressió entre factors de luminància mesurats i els donats pel fabricant, mesurades amb 8 i 14 bits pel sistema hiperespectral.

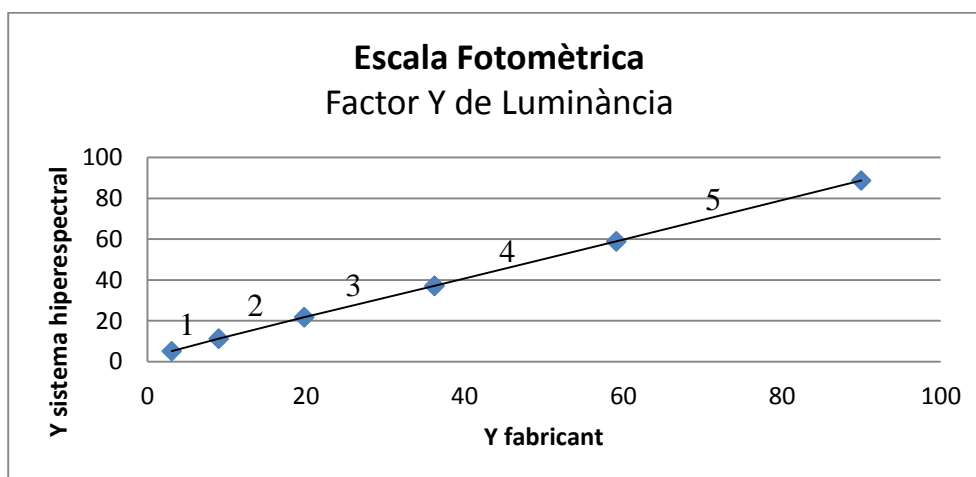


Figura 6.7 Escala fotomètrica del factor Y de reflectància en 8 bits.

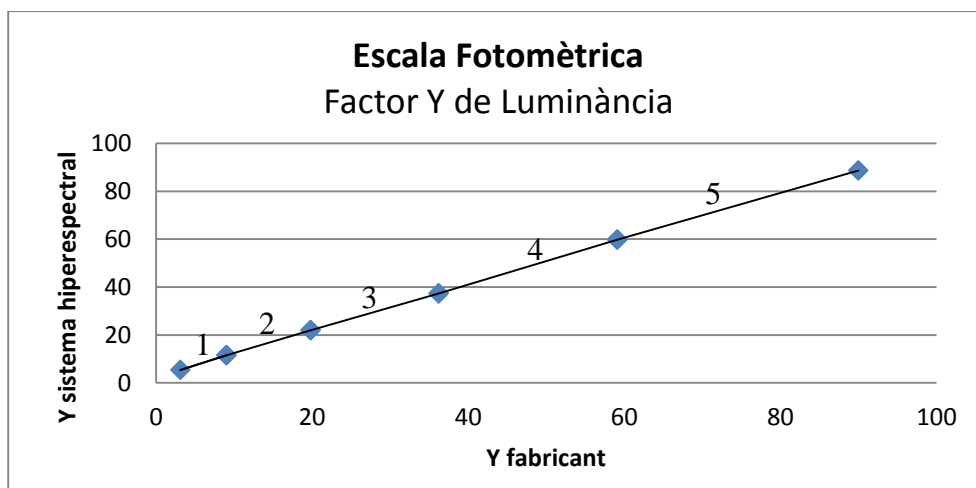


Figura 6.8 Escala fotomètrica del factor Y de reflectància en 14 bits.

6.4. Repetibilitat del sistema

En la **Taula 6.8** es poden observar els resultats de repetibilitat del sistema corresponents a les 10 mesures del blanc patró obtingudes amb una diferència temporal de 15' entre elles. S'especifiquen les mitjanes de les desviacions de color i la desviació estàndard (utilitzant els paràmetres ΔE_{ab} , ΔE_{94} , ΔE_{00} , GFC, IRE, CSCM, RMSE i wRMSE) observades entre les 10 mesures i la mitjana de totes elles. Tal i com es pot observar els resultats són molt bons per tots els paràmetres analitzats. Cal destacar les diferències de color, que en tots els casos són molt inferiors a una unitat. A més, cal destacar que la diferència en GFC és mínima i no queda representada en la taula de resultats. Els resultats de repetibilitat són semblants en 8 i 14 bits, tot i que lleugerament millors en aquest últim cas.

	ΔE_{ab}	ΔE_{94}	ΔE_{00}	GFC	IRE	CSCM	RMSE	wRMSE
Repetibilitat 8 bits	0,11	0,11	0,11	1,0000	0,38	0,50	0,0048	0,0040
Desviació Estàndard	0,07	0,07	0,04	0,0000	0,25	0,33	0,0030	0,0026
Repetibilitat 14 bits	0,10	0,10	0,08	1,0000	0,22	0,30	0,0023	0,0021
Desviació Estàndard	0,05	0,05	0,04	0,0000	0,13	0,18	0,0013	0,0013

Taula 6.8 Resultats de la repetibilitat del sistema hiperespectral amb 8 i 14 bits.

6.5. Reproductibilitat del sistema

En la **Taula 6.9**, en la **Figura 6.9** i en la **Figura 6.10** es mostren els resultats de reproductibilitat pel verd, el magenta, el groc i els colors neutres de la carta de colors CCCR, respectivament. Cal recordar que per quantificar la reproductibilitat del sistema s'han avaluat les desviacions de color de les mostres entre les mesures proporcionades per la càmera hiperespectral i l'espectrofotòmetre PR-655. De la mateixa manera que en l'apartat anterior, les desviacions de color entre parells de mesures proporcionades pels dos instruments s'especifiquen mitjançant els paràmetres ΔE_{ab} , ΔE_{94} , ΔE_{00} , GFC, IRE, CSCM, RMSE i wRMSE.

A la vista dels resultats es pot afirmar en primer lloc que no hi ha diferències evidents entre els resultats trobats amb 8 i 14 bits. Tal i com s'esperava, la reproductibilitat és pitjor en termes absoluts que la repetibilitat. Això es posa de manifest sigui quin sigui el paràmetre utilitzat per la comparació, és a dir, des de diferències de color, paràmetres espectrals i mètriques combinades. De l'anàlisi de les diferències entre les corbes es pot deduir que les longituds d'ona blavoses (inferiors a 500 nm) són les que contribueixen més a les diferències trobades entre instruments. Això pot ser degut a la baixa sensibilitat de la càmera CCD a aquestes longituds d'ona, ja que es descarta una possible poca emissió de la làmpada tipus D65 en aquesta regió espectral en observar la **Figura 6.11**. La **Figura 6.12** posa de manifest aquest efecte, ja que el perfil en nivells de gris del sistema hiperespectral corresponent a la font anterior presenta valors molt baixos per aquestes longituds d'ona. A més a la **Taula 6.9** es pot apreciar que la reproductibilitat és millor en els colors neutres, tot i que aquesta empitjora amb els colors més foscos.

També cal tenir en compte que els resultats que es mostren aquí provenen del càlcul de la mitjana de varis píxels d'una mateixa imatge captada. Realitzant la mitjana de varies imatges es podria reduir el soroll temporal del sistema i ajudar així a obtenir millors valors en les longitud d'ona blaves de l'espectre. D'altra banda, tot i haver verificat l'estabilització de la làmpada no s'ha verificat el comportament temporal del sistema hiperespectral en el seu conjunt. El canvi de temperatura en l'interior de la càmera etc. podria provocar que els resultats se'n veiessin afectats.

Per últim cal destacar que el sistema hiperespectral depèn d'un sistema de desplaçament addicional que permet realitzar l'escaneig lineal. En canvi, l'espectròmetre PR-655 no necessita aquest sistema d'escaneig ja que té un camp de visió de 1º. Això pot provocar una certa diferència entre les mesures dels instruments degut a la lleugera disparitat existent entre les geometries de mesura [Figura 6.13].

		ΔE_{ab}	ΔE_{94}	ΔE_{00}	GFC	IRE	CSCM	RMSE	wRMSE
8 bits	Verd	9,95	4,04	3,74	0,9911	16,60	28,84	0,0322	0,0320
	Magenta	5,97	2,74	2,54	0,9984	5,94	12,88	0,0254	0,0226
	Groc	12,15	3,15	2,97	0,9986	4,40	17,42	0,0297	0,0293
	Blanc	0,74	0,71	0,83	0,9997	1,52	2,53	0,0223	0,0122
	Neutre 8	0,96	0,95	0,82	0,9997	3,15	4,37	0,0226	0,0170
	Neutre 6,5	1,72	1,66	1,67	0,9997	5,66	7,63	0,0225	0,0206
	Neutre 5	2,75	2,65	2,91	0,9995	9,34	12,48	0,0213	0,0217
	Neutre 3,5	4,79	4,53	4,49	0,9979	20,41	26,32	0,0244	0,0252
	Negre	6,44	5,40	6,20	0,9895	25,39	34,27	0,0162	0,0158
14 bits	Verd	10,27	4,10	3,79	0,9911	16,40	28,97	0,0316	0,0317
	Magenta	6,52	2,96	2,78	0,9984	5,93	13,38	0,0248	0,0229
	Groc	11,97	3,10	2,94	0,9987	4,00	16,81	0,0286	0,0286
	Blanc	1,08	1,03	1,05	0,9940	1,62	3,14	0,0293	0,0147
	Neutre 8	1,38	1,38	1,19	0,9995	4,68	6,47	0,0327	0,0259
	Neutre 6,5	1,50	1,42	1,51	0,9994	4,46	6,45	0,0206	0,0160
	Neutre 5	3,32	3,16	3,45	0,9987	11,36	15,50	0,0275	0,0266
	Neutre 3,5	5,70	5,34	5,30	0,9957	24,15	31,52	0,0310	0,0308
	Negre	7,53	6,35	6,93	0,9822	31,79	42,26	0,0225	0,0213

Taula 6.9 Resultats de reproductibilitat obtinguts entre el sistema hiperespectral i l'espectrofotòmetre PR-655 de la mostra verda, magenta i groga de la carta de colors CCCR.

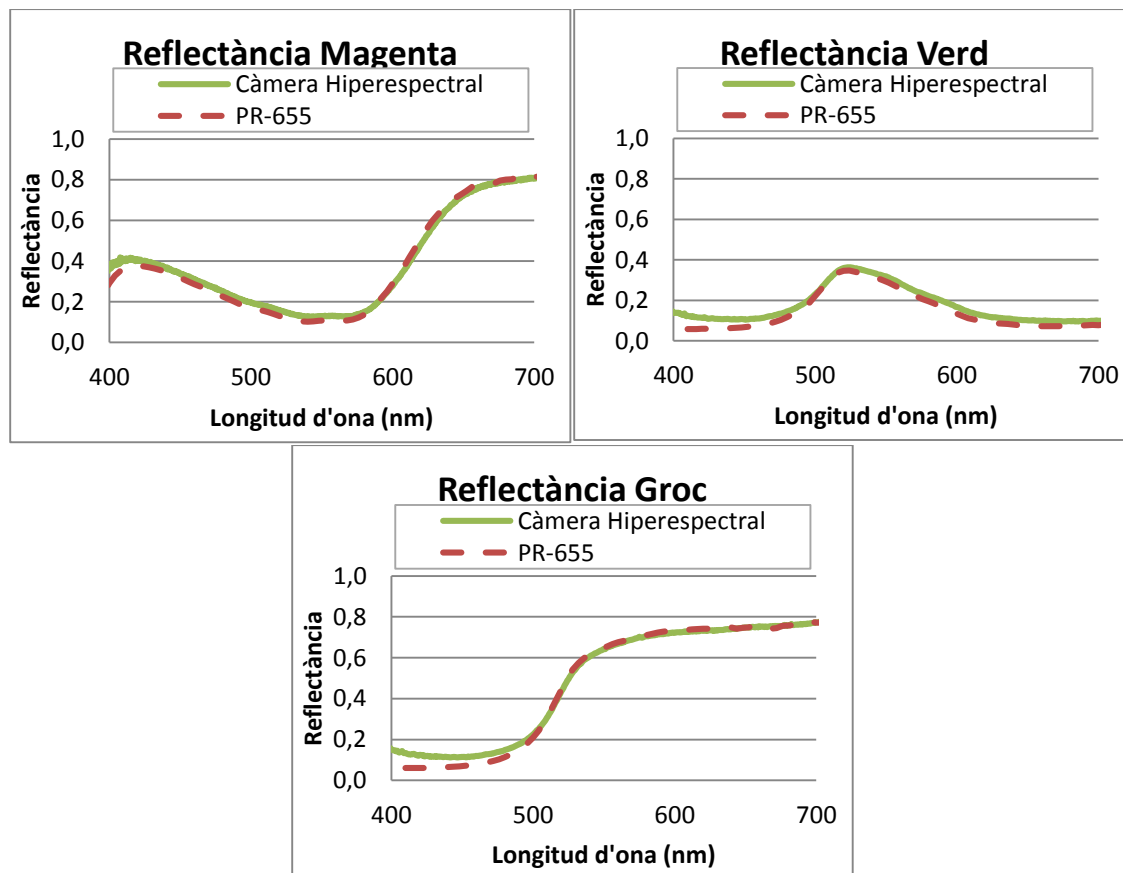


Figura 6.9 Comparació de reflectàncies mesurades amb la càmera hiperespectral (CH) i l'espectrofotòmetre PR-655 (PR), pels colors verd, magenta i groc de la carta de colors CCCR en 14 bits.

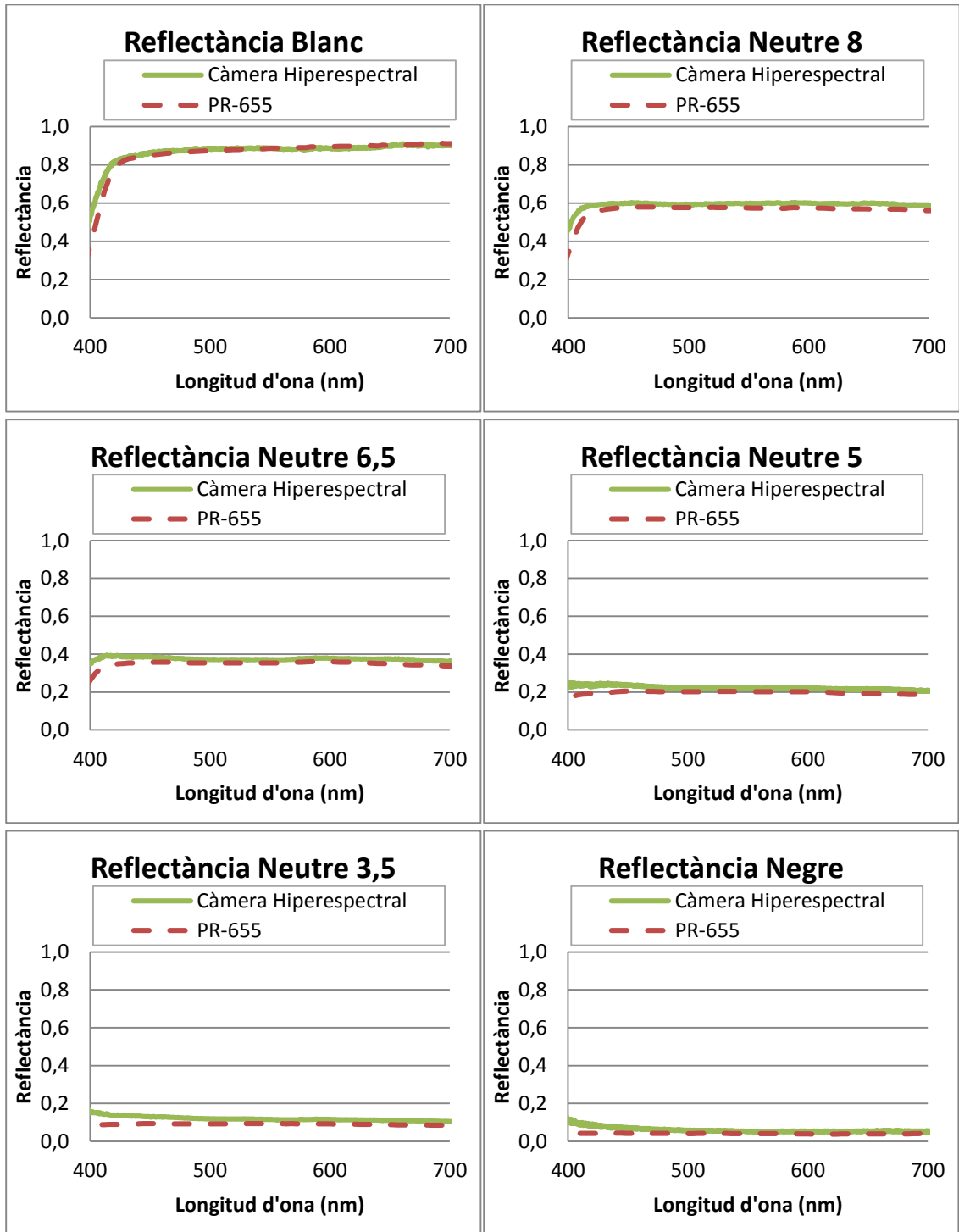


Figura 6.10 Comparació de reflectàncies mesurades amb la càmera hiperespectral (CH) i l'espectrofotòmetre PR-655 (PR), pels colors neutres de la carta de colors CCR en 14 bits.

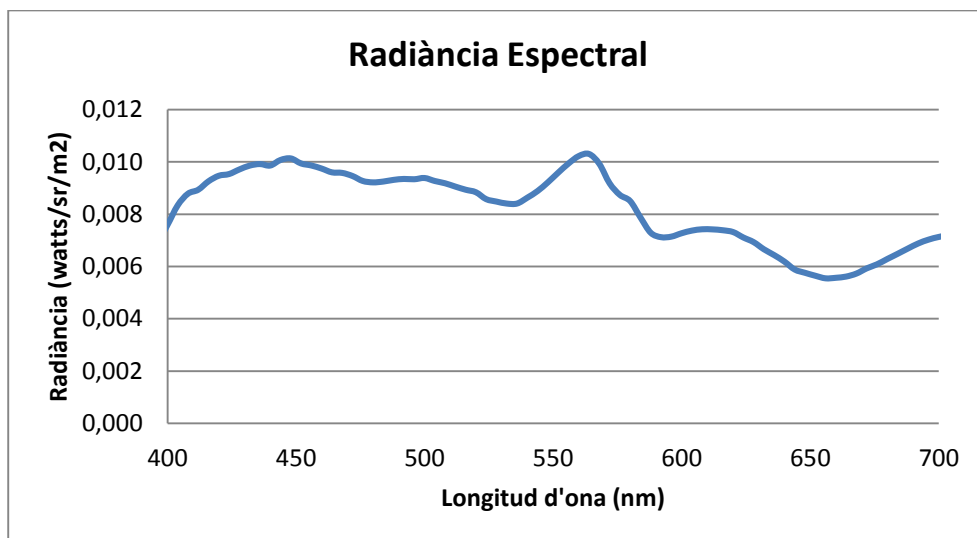


Figura 6.11 Gràfica de la radiància espectral del sistema d'il·luminació SpectraLight III amb font de llum tipus D65 reflectida pel blanc patró calibrat.

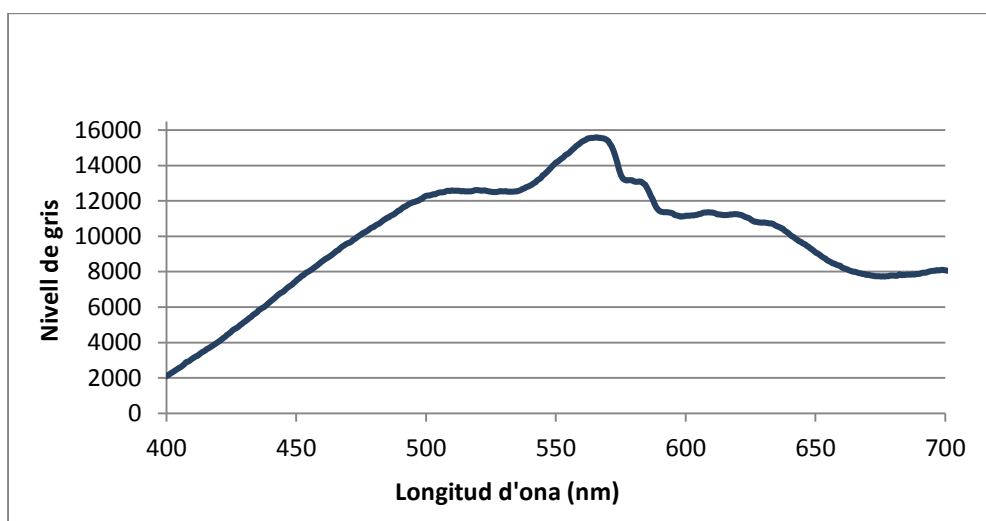


Figura 6.12 Gràfica del perfil en nivells de gris mesurat per la càmera hiperespectral quan es capta la llum tipus D65 reflectida pel blanc patró calibrat.

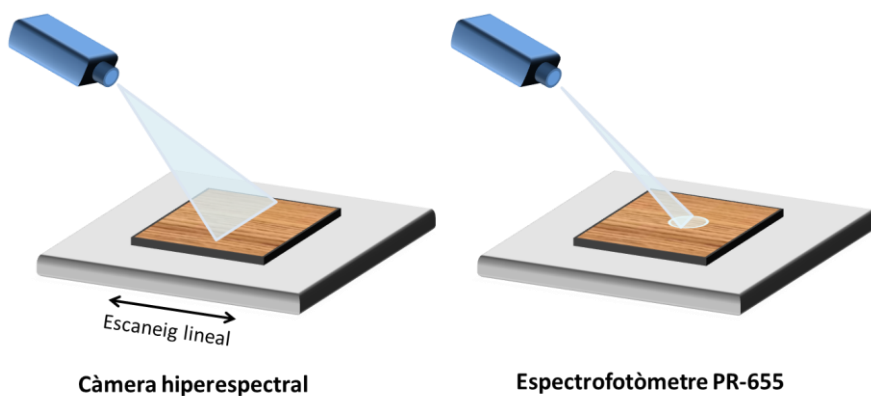


Figura 6.13 Esquema de l'obtenció de mesures amb la càmera hiperespectral i l'espectrofotòmetre PR-655.

7. CONCLUSIONS

De les dades obtingudes en els resultats de l'apartat anterior, es poden extreure les conclusions que s'exposen a continuació.

- L'estabilitat en l'emissió del sistema d'il·luminació que incorpora el sistema hiperespectral es pot considerar estable al voltant dels dos minuts (1,65 min) des de que s'encén. Així, cal esperar aquest temps abans de començar a fer mesures fiables.
- La càmera hiperespectral presenta una resposta lineal tant en 8 bits com en 14 bits en el rang espectral comprès entre 400 i 700 nm, pel què és vàlid per a realitzar mesures espectrals i de color en aquesta regió.
- Pel que fa al calibratge espectral del sistema es pot concloure que la precisió aconseguida és millor a 3.5 nm en totes les longituds d'ona. Respecte al calibratge radiomètric s'observa que el sistema presenta un bon comportament tant per al nivell de blanc, de negre com pel què fa a la linealitat del sistema.
- La repetibilitat del sistema és molt bona. Cal fer èmfasi en que les diferències de color entre mesures d'una mateixa mostra són molt menors que la unitat.
- En termes absoluts, la reproductibilitat no és tant bona com la repetibilitat a causa principalment de la baixa sensibilitat de la càmera CCD a les longituds d'ona blaves i la baixa relació senyal-soroll. A més, cal tenir en compte la diferència de geometria de mesura entre la càmera hiperespectral i l'espectròmetre PR-655.

Per tant, es podria concloure que el sistema hiperespectral pot ser utilitzat per a mesurar desviacions espectrals i de color píxel a píxel en mostres amb patrons espacialment complexos ja que ha estat calibrat tant espectralment com radiomètricament. Tal i com s'ha demostrat la seva repetibilitat és molt bona. Tot i així en estudis futurs s'hauria d'intentar millorar la precisió espectral del mateix emprant una regressió no lineal per a millorar la correspondència entre píxels i longituds d'ona. D'altra banda la reproductibilitat també es podria millorar per a obtenir valors de mesura més fiables realitzant algun tipus de correcció que minimitzés les diferències obtingudes en la regió dels blaus, com pot ser la utilització d'algun tipus d'il·luminació que permeti potenciar la llum blava que arriba al sensor i tenir en compte l'estabilització de la càmera hiperespectral al llarg del temps per l'escalfament del circuit. D'altra banda també caldria fer un estudi per millorar la relació senyal-soroll del sistema. En aquest sentit s'hauria d'arribar a un compromís entre augmentar al màxim el temps d'exposició i fer repeticions de les mesures. Això permetria minimitzar les fonts de soroll temporals associades al sistema.

8. BIBLIOGRAFIA

- Aikens, R., Agard, D. & Sedat, J., 1989. Solid-state imagers for microscopy. *Methods Cell Biol*, 29, pp.291–313.
- Ariana, D., Lu, Renfu & Guyer, D., 2006. Near-infrared hyperspectral reflectance imaging for detection of bruises on pickling cucumbers. *Computers and electronics in agriculture*, 53(1), pp.60–70. DOI: 10.1016/j.compag.2006.04.001.
- Assefa, M., 2010. Kubelka-Munk theory for efficient spectral printer modeling. *Tesis Doctoral*.
- ASTM, 2011. ASTM E2214-08. Standard Practice for Specifying and Verifying the Performance of Color-Measuring Instruments.
- Beyer, H., 1992. Accurate calibration of CCD-cameras. *Proceedings CVPR'92. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.IEE Computer Society*, pp.96–101. DOI: 10.1109/CVPR.1992.223221.
- Bianco, A. Del, Serafino, G. & Spöck, G., 2003. An introduction to spectral imaging. *Carinthian Tech Research GmbH*.
- Capilla, P., Artigas, J. & Pujol, J., 2002. *Fundamentos de colorimetria* 1 Ed., Saragossa: Universitat de València.
- Chang, C., 2001. *Hyperspectral data exploitation: theory and applications* 1 Ed., USA: Jhon Wiley & Sons.
- Collen-Gino, M., 2004. Noise, Noise, Noise. Disponible a: <http://www.astrophys-assist.com/educate/noise/noise.htm>. Accés: 14/06/2013
- Dudas, J., Jung, C., La Haye, M. L. & Chapman, G. H., 2007. A Fault-Tolerant Active Pixel Sensor for Mitigating Hot Pixel Defects. *2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp.1445–1448. DOI: 10.1109/CCECE.2007.362.
- Dudas, Jozsef, La Haye, Michelle L., Leung, J. & Chapman, Glenn H., 2007. A Fault-Tolerant Active Pixel Sensor to Correct In-Field Hot-Pixel Defects. In *DFT 2007. 22nd IEEE Conference on International Symposium on Defect and Fault-Tolerance in VLSI Systems*. pp. 517–525. DOI: 10.1109/DFT.2007.53.
- Edelman, G.J., Gaston, E., Van Leeuwen, T.G., Cullen, P.J. & Aalders, M.C.G., 2012. Hyperspectral imaging for non-contact analysis of forensic traces. *Forensic science international*, 223(1-3), pp.28–39. DOI: 10.1016/j.forsciint.2012.09.012.
- ElMasry, G. & Sun, D., 2010. *Principles of hyperspectral imaging technology* 1 Ed., San Diego: Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-374753-2.10001-2.
- Fischer, C. & Kakoulli, I., 2006. Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications. *Studies in Conservation*, 7(7), pp.3–16.
- Ganesan, P., 2010. Segmentation and edge detection of color images using cielab color space and edge detectors. *INTERACT. International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies*, pp.393–397. DOI: 10.1109/INTERACT.2010.5706186.

- Garini, Y., Young, I.T. & McNamara, G., 2006. Spectral imaging: principles and applications. *Cytometry. Part A : the journal of the International Society for Analytical Cytology*, 69(8), pp.735–47. DOI: 10.1002/cyto.a.20311.
- Geol Lee, S., Shamey, R., Hinks, D. & Jasper, W., 2011. Development of a comprehensive visual dataset based on a CIE blue color center: Assessment of color difference formulae using various statistical methods. *Color Research & Application*, 36(1), pp.27–41. DOI: 10.1002/col.20549.
- Gianinetto, M. & Lechi, G., 2004. The development of Superspectral approaches for the improvement of land cover classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11), pp.2670–2679. DOI: 10.1109/TGRS.2004.835347.
- Gómez-Sanchis, J., Gómez-Chova, L., Aleixos, N., Camps-Valls, G. & Montesinos-Herrero, C., 2008. Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins. *Journal of Food Engineering*, 89(1), pp.80–86. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.04.009.
- Govender, M., Chetty, K. & Bulcock, H., 2009. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water SA*, 33(2), pp.145–152.
- Gowen, A., Odonnell, C., Cullen, P., Downey, G. & Frias, J., 2007. Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science & Technology*, 18(12), pp.590–598. DOI: 10.1016/j.tifs.2007.06.001.
- Grahn, H.F. & Geladi, P., 2007. *Techniques and Applications of Hyperspectral Image Analysis* 1 Ed., England: John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9780470010884.
- Grietens, B., 2009. InGaAs cameras allow broader NIR applications. Disponible a: <http://optics.org/cws/article/industry/38064>. Accés: 14/06/2013
- Hardie, R C, Hayat, M M, Armstrong, E. & Yasuda, B., 2000. Correction with video sequences and registration. , 39(8), pp.1241–1250.
- Hayat, M M, Torres, S.N., Armstrong, E., Cain, S.C. & Yasuda, B., 1999. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays. *Applied optics*, 38(5), pp.772–80.
- Healey, G. & Kondepudy, R., 1994. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(3), pp.267–276.
- Hernández-Andrés, J, Romero, J & Lee, R.L., 2001. Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 18(2), pp.412–20.
- Hill, B., Roger, T. & Vorhagen, F., 1997. Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 16(2), pp.109–154. DOI: 10.1145/248210.248212.
- Holts, G. & Lomheim, T., 2007. *CMOS/CCD Sensors and Camera System* 1 Ed., USA: JCD Publishing.
- Imai, Fh & Berns, R., 1999. Spectral estimation using trichromatic digital cameras. *Conference on International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives*, pp.42–49.
- Imai, FH, Rosen, M. & Berns, R., 2002. Comparative study of metrics for spectral match quality. In *CGIV 2002: The First European Conference on Colour Graphics, Imaging and Vision*. pp. 495–499.
- Janesick, J., 2001. *Scientific Charged-Coupled Devices* 1 Ed., USA: SPIE Publications.

- Kang, H., 2006. *Computational Color Technology* 1 Ed., USA: The International Society for Optical Engineering.
- Khoobehi, B., 2004. Hyperspectral Imaging for Measurement of Oxygen Saturation in the Optic Nerve Head. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 45(5), pp.1464–1472. DOI: 10.1167/iovs.03-1069.
- Klein, M., Aalderink, B., Padoan, R., Bruin, de G. & Steemers, T., 2008. Quantitative hyperspectral reflectance imaging. *Sensors*, 8(9), pp.5576–5618. DOI: 10.3390/s8095576.
- Kodak, 2005. CCD Image Sensor Noise Sources. *Application Note*, pp.1–7.
- De Lasarte, M., Pujol, J., Arjona, M. & Vilaseca, M., 2007. Optimized algorithm for the spatial nonuniformity correction of an imaging system based on a charge-coupled device color camera. *Applied optics*, 46(2), pp.167–74.
- Leung, J., Chapman, Glenn H., Koren, I. & Koren, Z., 2009. Characterization of Gain Enhanced In-Field Defects in Digital Imagers. *DFT '09. 24th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems.*, pp.155–163. DOI: 10.1109/DFT.2009.49.
- Litwiller, D, 2001. CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. *Photonics Spectra*, (January). Disponible a: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:CCD+vs+.+CMOS+:+Facts+and+fiction#2>. Accès: 14/06/2013
- Litwiller, Dave, 2005. CMOS vs. CCD: Maturing Technologies, Maturing Markets. *Photonics Spectra*, (August).
- Liu, Z., Li, Q., Yan, J. & Tang, Q., 2007. A novel hyperspectral medical sensor for tongue diagnosis. *Sensor Review*, 27(1), pp.57–60. DOI: 10.1108/02602280710723497.
- López-Álvarez, M., 2005. Colorimetric and spectral combined metric for the optimization of multispectral systems. *AIC Colour 05. 10th Congress of the International Colour Association*, pp.1685–1688.
- López-Alvarez, M. a, Hernández-Andrés, Javier, Romero, Javier, Olmo, F.J., Cazorla., 2008. Using a trichromatic CCD camera for spectral skylight estimation. *Applied optics*, 47(34), pp.H31–8.
- Lu, R, 2003. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging. *American Society of Agricultural Engineers*, 46(2), pp.1–8.
- Lukac, R. & Smolka, B., 2005. Vector filtering for color imaging. *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.74–86.
- Luo, M.R., Cui, G. & Rigg, B., 2001. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research & Application*, 26(5), pp.340–350. DOI: 10.1002/col.1049.
- Marshall, C.J., Marshall, P.W., Waczynski, A., Polidan, E.J. & Johnson, S.D., 2005. Hot pixel annealing behavior in CCDs irradiated at -84/spl deg/C. *Nuclear Science*, 52(6), pp.2672–2677. DOI: 10.1109/TNS.2005.860731.
- Martin, M., Wabuyele, M. & Chen, K., 2006. Development of an advanced hyperspectral imaging (HSI) system with applications for cancer detection. *Annals of biomedical Engineering*, 34(6), pp.1061–8. DOI: 10.1007/s10439-006-9121-9.

- Mehl, P.M., Chen, Y.-R., Kim, M.S. & Chan, D.E., 2004. Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations. *Journal of Food Engineering*, 61(1), pp.67–81. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00188-2.
- Montmessin, F., Gondet, B., Biring, J.P., Langevin, Y., Drossart, P., 2007. Hyperspectral imaging of convective CO₂ ice clouds in the equatorial mesosphere of Mars. *Geophysical Research*, 112(E11), pp.1–14. DOI: 10.1029/2007JE002944.
- Naganathan, G., Grimes, L., Subbiah, J., Calkins, C., Samal, A., et al., 2008. Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction. *Computers and electronics in agriculture*, 64(2), pp.225–233. DOI: 10.1016/j.compag.2008.05.020.
- Nieman, L., Sinclair, M., Timlin, J., Jones, H. & DM, H., 2006. Hyperspectral imaging system for quantitative identification and discrimination of fluorescent labels in the presence of autofluorescence. *3rd IEEE International Symposium Conference on Biomedical Imaging: Nano to Macro*, pp.1288–1291.
- Othman, H., 2006. Noise reduction of hyperspectral imagery using hybrid spatial-spectral derivative-domain wavelet shrinkage. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(2), pp.397–408. DOI: 10.1109/TGRS.2005.860982.
- Plaza, A. & Plaza, J., 2010. Impact of Vector Ordering Strategies on Morphological Unmixing of Remotely Sensed Hyperspectral Images. *ICPR. 20th International Conference on Pattern Recognition*, pp.4412–4415. DOI: 10.1109/ICPR.2010.1072.
- Qin, J. & Lu, Renfu, 2008. Measurement of the optical properties of fruits and vegetables using spatially resolved hyperspectral diffuse reflectance imaging technique. *Postharvest Biology and Technology*, 49(3), pp.355–365. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2008.03.010.
- Ratliff, B.M., Hayat, Majeed M & Hardie, Russell C, 2002. correction in focal-plane arrays. *Optical Society of America*, 19(9), pp.1737–1747.
- Schultz, R. a, Nielsen, T., Zavaleta, J.R., Ruch, R. & Wyatt, R., 2001. Hyperspectral imaging: a novel approach for microscopic analysis. *Cytometry*, 43(4), pp.239–47.
- Sharma, G., Wu, W. & Dalal, E.N., 2005. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*, 30(1), pp.21–30. DOI: 10.1002/col.20070.
- Siesler, H., Ozaki, Y., Kawata, S. & Heise, H., 2002. *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications* 1 Ed., Weinheim: Wiley-VCH.
- Stothard, D., Dunn, M. & Rae, C., 2004. Hyperspectral imaging of gases with a continuous-wave pump-enhanced optical parametric oscillator. *Optics express*, 12(5), pp.947–55.
- Themelis, G., Yoo, J.S. & Ntziachristos, V., 2008. Multispectral imaging using multiple-bandpass filters. *Optics Letters*, 33(9), pp.1023–1025.
- Thomson, M. & Westland, S., 2001. Colour-Imager characterization by parametric fitting of sensor responses. *Color Research & Application*, 26(6), pp.442–449.
- Tominaga, S., 1990. A color classification method for color images using a uniform color space. *ICPR. 10th International Conference on Pattern Recognition*, pp.803–807.
- Torres, S., Pezoa, J. & Hayat, M., 2003. Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form. *Applied optics*, 42(29), pp.5872–5881.

- Tyson, J., 1986. Low-light-level charge-coupled device imaging in astronomy. *JOSA A*, 3(12), pp.2131–2138.
- Vermaas, W.F.J., Timlin, J. a, Jones, H.D.T., Sinclair, M.B. & Nieman, L.T., 2008. In vivo hyperspectral confocal fluorescence imaging to determine pigment localization and distribution in cyanobacterial cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(10), pp.4050–5. DOI: 10.1073/pnas.0708090105.
- Vliet, L. Van, Boddeke, F., Sudar, D. & Young, I., 1998. *Image detectors for digital image microscopy 1* Ed., Chichester (UK): John Wiley & Sons.
- Vo-Dinh, T., 2004. A hyperspectral imaging system for in vivo optical diagnostics. *Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 23(5), pp.40–49. DOI: 10.1109/MEMB.2004.1360407.
- Wyszecki, G. & Stiles, W., 1982. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* 2 Ed., Nova York: Jhon Wiley & Sons.
- Zhao, Y. & Berns, R.S., 2007. Image-based spectral reflectance reconstruction using the matrix R method. *Color Research & Application*, 32(5), pp.343–351. DOI: 10.1002/col.20341.
- Zhou, G., Cheo, K.K.L., Du, Y., Chau, F.S., Feng, H., et al., 2009. Hyperspectral imaging using a microelectrical-mechanical-systems-based in-plane vibratory grating scanner with a single photodetector. *Optics letters*, 34(6), pp.764–6.