

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Informatica

Tesi di Laurea Magistrale

Realtà virtuale per la gestione degli incendi boschivi: Simulazione della  
propagazione del fuoco e dell'azione degli operatori



Relatore

prof. Fabrizio Lamberti

Candidato

Fabio Gavinelli

Sessione di ottobre 2020



# Sommario

La realtà virtuale (VR) è una tecnologia che negli ultimi anni è stata oggetto di un rinnovato interesse, anche grazie ai grandi passi in avanti avvenuti trasversalmente in ogni aspetto dell'elettronica, che ne hanno permesso lo sviluppo. La VR è quindi passata dall'essere una tecnologia impiegata prettamente nell'ambito dell'intrattenimento all'essere utilizzata in moltissimi settori diversi, tra cui l'addestramento. Grazie all'elevato livello di immersione e la possibilità di ricreare scenari complessi e pericolosi senza mettere l'utente realmente in pericolo, la VR risulta essere uno strumento estremamente efficace per la simulazione di situazioni di rischio.

In questo elaborato si analizzerà il lavoro svolto nella realizzazione di un'applicazione in VR finalizzata all'addestramento alla gestione di un incendio boschivo per il Corpo dei Volontari Antincendi Boschivi Piemonte (AIB). Gli utenti saranno chiamati, con l'aiuto di due Personaggi Non-Giocanti, o Non-Player Character (NPC), ad intervenire, impugnando ed usando i reali strumenti adoperati anche sul campo (pala, rastro e flabello), per contrastare la diffusione un incendio simulato. Nel farlo, la loro prestazione sarà valutata in modo puntuale così da poter correggere gli eventuali errori commessi. In particolare, in questo documento verranno analizzate le varie tecniche impiegate per la realizzazione della simulazione dell'incendio, degli strumenti e delle interazioni degli strumenti con il fuoco oltre che per la gestione degli aspetti grafici e della logica a supporto degli NPC.



# Ringraziamenti

In primis vorrei ringraziare il mio relatore, il prof. Fabrizio Lamberti, che mi ha dato fiducia affidandomi questo lavoro di tesi e mi ha guidato e sostenuto nel corso del progetto. Un ringraziamento speciale va anche a Federico De Lorenzis, grazie al quale le ore in laboratorio sono trascorse con leggerezza ed i cui suggerimenti hanno rappresentato per me una preziosa guida.

Ringrazio calorosamente anche Sergio Pirone, Augusto Cotterchio e Paolo Maritano del Centro di formazione AIB per la loro disponibilità, professionalità e per l'entusiasmo che hanno dimostrato in ogni fase del progetto.



# INDICE

1	Introduzione .....	1
1.1	Contesto.....	1
1.1.1	Progetto RISK FOR .....	1
1.1.2	AIB Piemonte.....	1
1.2	Il Corpo dei volontari .....	2
1.3	Incendi boschivi .....	2
1.3.1	Fuoco.....	3
1.3.2	Tipi di incendio boschivo.....	4
1.3.3	Struttura e propagazione .....	5
1.3.4	Rischi .....	8
1.3.5	Possibili azioni di contenimento dell'incendio .....	8
1.3.6	Strumenti.....	9
1.3.6.1	Pala .....	9
1.3.6.2	Rastro .....	10
1.3.6.3	Flabello .....	10
1.4	Scopo della tesi.....	11
2	Stato dell'arte .....	12
2.1	Realtà Virtuale.....	12
2.1.1	Immersione e presenza.....	12
2.1.2	Vantaggi e svantaggi dell'addestramento in VR .....	13
2.2	Strumenti di simulazione della propagazione del fuoco .....	13
2.2.1	FlamMap.....	13
2.2.2	Simtable .....	14
2.2.3	Far Cry 2 .....	15
2.2.4	FLAIM .....	17
2.2.5	Addestramento in realtà virtuale per i vigili del fuoco .....	19
2.2.6	KIMM simulator .....	19
3	Tecnologie utilizzate .....	21
3.1	Unity.....	21
3.1.1	Obi Rope .....	22
3.1.2	Bézier Path Creator .....	22
3.1.3	Animation Rigging.....	23
3.2	Software di supporto .....	23

3.2.1	Visual Studio.....	23
3.2.2	Blender.....	24
3.2.3	GIMP.....	25
3.3	HTC Vive.....	25
3.3.1	Head-Mounted Display.....	26
3.3.2	Base station 2.0.....	27
3.3.3	Controller.....	27
3.3.4	Sensori (Tracker).....	28
4	Progettazione.....	29
4.1	Acquisizione del materiale.....	29
4.2	Storyboard.....	29
4.3	Interazioni con l'applicazione.....	30
4.3.1	Uso degli strumenti.....	30
4.3.2	Locomozione.....	30
4.4	Modalità.....	31
4.4.1	Valutazione dell'operatore.....	32
4.5	Ambientazione.....	33
4.6	Progettazione della simulazione dell'incendio.....	34
4.7	Menu iniziale.....	35
4.7.1	Strumento.....	36
4.7.2	Mano dominante e caratteristiche dell'operatore.....	37
4.7.3	Caratteristiche dell'incendio.....	37
4.7.4	NPC.....	37
4.8	Progettazione degli NPC.....	37
4.9	La validazione.....	39
5	Realizzazione.....	40
5.1	Propagazione dell'incendio.....	41
5.1.1	Generazione del terreno.....	41
5.1.2	Diffusione delle fiamme.....	46
5.2	Realizzazione degli strumenti.....	52
5.2.1	Realizzazione del rastro.....	52
5.2.2	Realizzazione della pala.....	56
5.2.3	Realizzazione flabello.....	59
5.3	NPC.....	60
5.4	Sistemi particellari ed effetti grafici.....	65
5.4.1	Visual Effect Graph.....	66

5.4.2	Sistema particellare del fuoco .....	68
5.4.3	Sistema particellare del fumo.....	71
5.4.4	Sistemi particellari di interazione degli strumenti .....	72
5.4.5	Annerimento del terreno .....	73
6	Conclusione e sviluppi futuri .....	77



# Indice delle figure

Figura 1 Triangolo del fuoco.....	3
Figura 2 Nomenclatura incendio.....	6
Figura 3 Fuoco propagato in piano in presenza di vento .....	7
Figura 4 Fuoco propagato in piano in assenza di vento .....	7
Figura 5 Pala.....	9
Figura 6 Rastro.....	10
Figura 7 Flabello.....	10
Figura 8 FlamMap - immagine dalla pagina dedicata del sito del progetto Fire, Fuel, Smoke ScienceProgram.....	14
Figura 9 Simtable, un utente da inizio alla simulazione accendendo il fuoco con un accendino .....	15
Figura 10 Far Cry 2 .....	17
Figura 11 Un utente che usa FLAIM – immagine tratta del video <a href="https://www.youtube.com/watch?v=B_DRZGkoejY&amp;t=104s">https://www.youtube.com/watch?v=B_DRZGkoejY&amp;t=104s</a> al minuto 1:13.....	18
Figura 12 Equipaggiamento FLAIM Systems.....	18
Figura 13 simulazione del fuoco nella sala computer.....	19
Figura 14 Interfaccia grafica di Unity .....	21
Figura 15 ObiRope - immagine tratta dall'asset store di Unity <a href="https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/obi-rope-55579">https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/obi-rope-55579</a> .....	22
Figura 16 Blender.....	24
Figura 17 GIMP .....	25
Figura 18 Head Mounted Display.....	26
Figura 19 Base stations .....	27
Figura 20 Controller.....	28
Figura 21 Tracker.....	28
Figura 22 Ambientazione dell'applicazione vista dall'alto.....	34
Figura 23 Grafico scelte menu .....	36
Figura 24 Comparazione casco reale e modello realizzato .....	39
Figura 25 Modello NPC .....	39
Figura 26 Dottorando prova l'applicazione con tutto il setup completo.....	40
Figura 27 Esempio scansione terreno .....	44
Figura 28 Terreno finale, lato tile 1m .....	45
Figura 29 Terreno finale, lato tile 0,25m .....	46
Figura 30 diffusione incendio con innesco a fronte di fuoco .....	48
Figura 31 diffusione incendio con innesco a spot .....	48
Figura 32 Flow chart della funzione "propagate" eseguita dallo script Fire Manager .....	49
Figura 33 Visualizzazione della matrice del vento .....	51
Figura 34 Visualizzazione delle posizione chiave usate per tracciare il movimento del rastro .....	53
Figura 35 Effetto del rastro: a sinistra un mucchio di foglia prima del passaggio del rastro, a destra lo stesso mucchio di foglie dopo il passaggio del rastro .....	55
Figura 36 Pala parallela al terreno con visualizzazione punti di riferimento .....	57
Figura 37 Pala ruotata con visualizzazione punti di riferimento.....	57
Figura 38 Realizzazione flabello nell'applicazione .....	59
Figura 39 NPC e aree di controllo.....	62
Figura 40 Visualizzazione fuochi indicati dall'utente .....	63

<i>Figura 41 Fuoco all'interno del cono di vista dell'NPC.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 42 Fuoco fuori dal cono di vista dell'NPC .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 43 Visual Effect Graph .....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 44 Comparazione prestazioni di un sistema particellare simulato sulla CPU rispetto ad uno simulato sulla GPU.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 45 NPC impegnato nell'attività di spegnimento del fuoco .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 46 Effetto parametro Size .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 47 Effetto parametro Strenght .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 48 Effetto aumento di luminosità .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 49 Effetto del vento sul sistema particellare del fumo .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 50 Comparazione dell'effetto di diffusione dell'incendio reale e simulato: a sinistra la diffusione di un incendio reale, a destra la diffusione dell'incendio nella simulazione .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 51 Effetto di annerimento del terreno .....</i>	<i>76</i>



# 1 Introduzione

## 1.1 Contesto

Questa tesi si sviluppa nel contesto delle applicazioni per l'addestramento del personale addetto alla gestione delle emergenze e dei rischi connessi ad esse tramite l'impiego di tecnologie di realtà virtuale (VR) e nasce nell'ambito del progetto RISK FOR (parte di un più ampio progetto trans-nazionale ALCOTRA tra Italia e Francia) nel quale si sono concretizzate una serie di attività di collaborazione tra il Politecnico di Torino e la Protezione Civile della Regione Piemonte.

### 1.1.1 Progetto RISK FOR

Il progetto RISK FOR fa parte del progetto PITEM RISK che mira ad aumentare la capacità dei territori Alcotra<sup>1</sup> di prevenire e gestire le situazioni di rischio attraverso diversi strumenti, tra i quali spicca quello della formazione, elemento essenziale che consente di comprendere meglio i rischi e acquisire i comportamenti adeguati alla loro gestione. Il progetto si propone di sviluppare strumenti di VR e diffonderne l'utilizzo sia tra gli operatori che tra la popolazione, col fine di aumentare la consapevolezza riguardo ai rischi ed ai corretti comportamenti da osservare in caso di pericolo derivante da rischi naturali (Regione Piemonte, s.d.)

### 1.1.2 AIB Piemonte

Il Corpo AIB Piemonte nasce ufficialmente il 4 marzo 2000 quando viene istituito il "Corpo Volontari Antincendi Boschivi del Piemonte", le sue radici, però, risalgono a molto prima; più precisamente nel 1994 viene istituita l'"Associazione Regionale Volontari Antincendi Boschivi del Piemonte" con lo scopo di riunire le diverse realtà di volontariato del settore presenti sul territorio già a partire dai primi anni '70 (Corpo Volontari Antincendi Boschivi, s.d.).

---

<sup>1</sup> Con territori Alcotra si intendono quelli compresi all'interno dell'omonimo progetto transnazionale italo-francese

Il sistema AIB piemontese può contare oggi sul supporto tecnico del Corpo Forestale dello Stato, del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco e del Corpo volontari AIB del Piemonte (Corpo Volontari Antincendi Boschivi, s.d.).

Il sistema AIB piemontese è quindi l'organo che, a livello regionale, si occupa di combattere gli incendi che ogni anno colpiscono i boschi del territorio, importante presidio contro frane e smottamenti e utile risorsa economica per le popolazioni del luogo (Corpo Volontari Antincendi Boschivi, s.d.).

## 1.2 Il Corpo dei volontari

Il Corpo volontari AIB conta attualmente più di 5000 membri, i quali si dividono in AIB volontari ed AIB ausiliari e si organizzano a livello gerarchico, in ordine di grado, in: Capisquadra, Comandanti di Distaccamento, Ispettori Provinciali, Referenti Provinciali e Ispettori Regionali del Corpo.

Il Corpo lavora sull'intero territorio regionale nella lotta agli incendi boschivi in tutti i suoi aspetti, dalla sorveglianza, all'estinzione del fuoco e a tutti gli aspetti di manutenzione dell'ambiente forestale. Grazie alla convenzione con la Regione Piemonte, in un modello unico in Italia, il Corpo può sempre contare su mezzi e risorse.

Per diventare volontari del Corpo AIB occorre seguire un corso di formazione specifico in cui si apprendono tutte le nozioni e comportamenti da seguire nella gestione delle emergenze e dei vari compiti che si andranno a svolgere. Il corso si divide in una parte teorica, in cui i futuri volontari seguono delle lezioni in formato video sotto la supervisione di un istruttore che poi li interrogherà a riguardo secondo un metodo di apprendimento studiato appositamente e migliorato negli anni, e in una parte pratica in cui, divisi in squadre, questi dovranno provare ad affrontare i diversi scenari in cui si troveranno a lavorare. Prima di passare all'addestramento pratico ogni volontario sarà sottoposto ad un test per verificarne le competenze teoriche; inoltre, le abilità pratiche dei volontari verranno ricontrollate ciclicamente in modo da verificare che le nozioni apprese non siano state abbandonate in favore di cattive abitudini sviluppatesi nel tempo.

## 1.3 Incendi boschivi

Secondo la definizione data dalla "Legge quadro nazionale 21 novembre 2000 n. 353 art. 2":

“Per incendio boschivo si intende un fuoco con suscettibilità ad espandersi su aree boscate, cespugliate o arborate, comprese eventuali strutture ed infrastrutture antropizzate poste all’interno delle predette aree, oppure su terreni coltivati o incolti e pascoli limitrofi a dette aree”.

Rientra quindi in questa definizione un qualsiasi processo di combustione che avviene prevalentemente in un’area boschiva o naturale e che risulta difficile da spegnere e controllare.

### 1.3.1 Fuoco

Con *fuoco* si intende una reazione chimica di tipo esotermico (cioè che libera calore), che si manifesta sottoforma del processo di combustione, ovvero quel processo di ossidazione di un combustibile da parte di un comburente in cui è sviluppata energia che si manifesta sotto forma di luce e calore. La fiamma con cui si è abituati a visualizzare il fuoco altro non è che un insieme di gas incandescenti sviluppatisi durante la combustione (De Zorzi, et al., 2009).

Per facilitare la visualizzazione del processo che innesca e sostiene la combustione si utilizza il cosiddetto “triangolo del fuoco”, mostrato in Fig. 1, il quale serve a rappresentare i tre elementi che supportano il processo di combustione: il comburente (ossigeno), il combustibile (le sostanze vegetali che sono bruciate nella combustione) ed il calore (innesco).

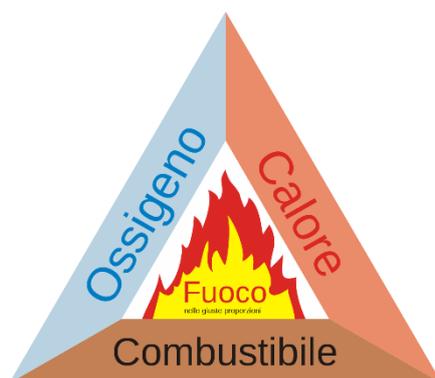


Figura 1 Triangolo del fuoco

L’innesco (inizialmente esterno) porta calore al combustibile che, scaldato, inizierà ad emettere gas combustibili, raggiunta la “temperatura di accensione” i gas combustibili inizieranno a reagire con l’ossigeno (il comburente) dando inizio alla combustione. Una volta avviata, la combustione continuerà ad alimentarsi senza più avere necessità di un innesco esterno, poiché sarà l’energia rilasciata dalla reazione stessa ad alimentarla.

I tre elementi del triangolo devono essere sempre presenti contemporaneamente affinché la combustione abbia luogo. Per poter interrompere una reazione già in atto si può quindi agire su una qualsiasi delle tre componenti tramite:

- *raffreddamento*: procedura di riduzione del calore nella zona dell'incendio, per esempio, con l'applicazione di acqua o altre sostanze;
- *soffocamento*: procedura di riduzione del comburente (ossigeno) che alimenta la combustione, per esempio comprimendo il combustibile con una pala;
- *rimozione del combustibile*: procedura di rimozione del composto vegetale infiammabile dalla zona interessata dall'incendio.

### 1.3.2 Tipi di incendio boschivo

Un incendio boschivo si divide in quattro categorie, che si diversificano a seconda di come l'incendio si propaghi e quali parti del bosco intacchi, nelle seguenti categorie.

- *Incendio radente*: si propaga nel sottobosco della foresta, bruciando la lettiera, i cespugli, le erbe e i detriti morti; si può diffondere anche in formazioni cespugliose, nei prati e nei pascoli (Regione Piemonte, s.d.).
- *Incendio di chioma*: si propaga dalla cima di un albero all'altra. Può avere una relazione minore o maggiore con l'incendio radente ed il più delle volte è questo che scatena l'incendio di chioma (Regione Piemonte, s.d.).
- *Incendio di barriera*: è la somma di incendio radente e di incendio di chioma, che formano un unico fronte di fiamma (Regione Piemonte, s.d.).
- *Incendio sotterraneo*: si propaga all'interno della lettiera e dell'humus, nello strato che copre il suolo minerale. Avanza molto lentamente, ma può avere gravi conseguenze poiché danneggia l'apparato radicale delle piante (Regione Piemonte, s.d.).

Nell'applicazione realizzata, l'utente si trova ad affrontare un incendio radente che si diffonde su un letto di foglie ed erba. Il tipo di combustibile è stato scelto per donare all'incendio le caratteristiche adeguate, in quanto ogni tipologia di incendio prevede l'adozione delle corrette tecniche per essere trattato e non è ovviamente possibile gestire ogni incendio allo stesso modo.

Le caratteristiche ricercate sono quelle di un incendio radente di media intensità, che possa essere affrontato direttamente con strumenti manuali. Dopo varie riunioni di progettazione con i riferimenti del Corpo AIB si è deciso di implementare un incendio con altezza della fiamma al massimo di un metro e con velocità variabile, selezionabile dall'istruttore prima di cominciare la simulazione, tra 1m/min (velocità tipica di un fuoco prescritto) e 4m/min (una velocità abbastanza sostenuta per un incendio radente).

Questi parametri collocano l'incendio simulato a metà tra due sottocategorie di incendio radente: l'*incendio radente di lettiera* e l'*incendio radente di strato erbaceo*, con caratteristiche che tendono di più al primo rispetto che al secondo.

“L'incendio radente di lettiera interessa lo strato meno compatto della lettiera, quella cioè che non ha ancora subito forti processi di decomposizione, quindi foglie secche, strobili, frammenti di corteccia, rametti morti (combustibile leggero). La velocità di propagazione è intorno ai 2–3 m/min, l'altezza delle fiamme raggiunge al massimo 1 m di altezza (limite per l'intervento con attrezzature manuali da parte delle squadre a terra) e l'intensità del fronte di fiamma è medio-bassa (100 KW/m – 800 KW/m).” (De Zorzi, et al., 2009); “L'incendio radente di strato erbaceo è caratterizzato dalla combustione dello strato erbaceo secco senza interessamento dei fusti di eventuali piante presenti. La velocità di propagazione è generalmente più alta (5–10 m/min) rispetto all'incendio radente di lettiera, con altezza di fiamma limitata a circa 1 m e intensità del fronte di fiamma ancora medio-bassa. Come nell'incendio radente di lettiera il fronte di avanzamento delle fiamme è continuo e regolare per l'omogeneità e la continuità orizzontale del combustibile” (De Zorzi, et al., 2009).

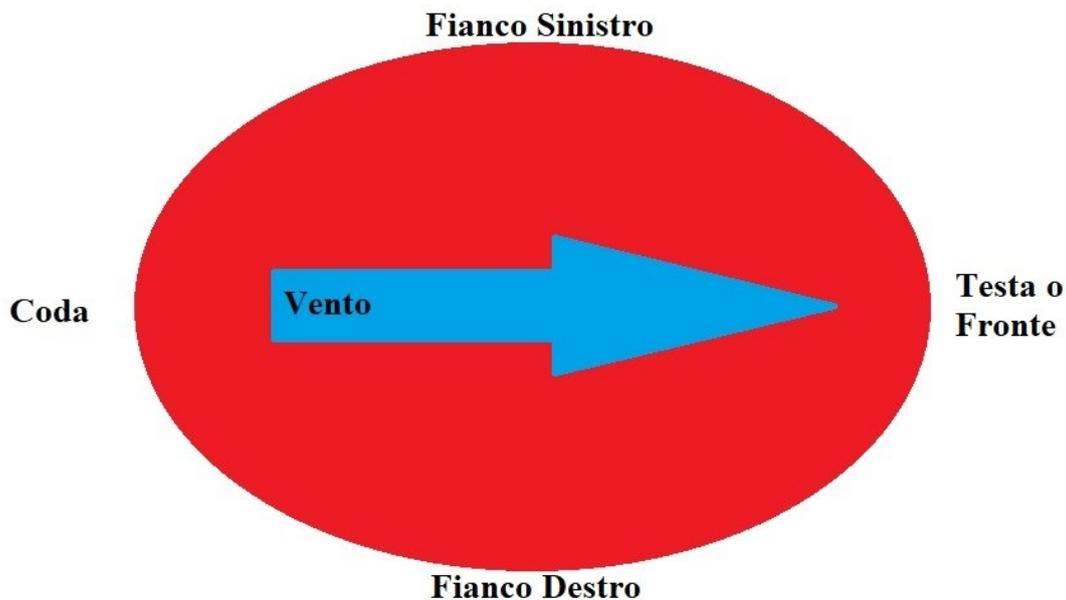
### 1.3.3 Struttura e propagazione

Un incendio non è definito da una forma precisa, ma esistono caratteristiche comuni che permettono di determinare una struttura tipica ed assegnargli una nomenclatura (Fig. 2).

Si chiama *testa* o *fronte* la parte più avanzata dove l'incendio si propaga con velocità maggiore. Solitamente è la parte sotto vento.

Si chiamano *fianchi* le parti laterali rispetto al fronte di avanzamento. Sui fianchi la velocità di propagazione è solitamente molto inferiore.

Si chiama *coda* il lato posteriore, dove la velocità di avanzamento è nettamente inferiore. Solitamente è la parte contro vento.



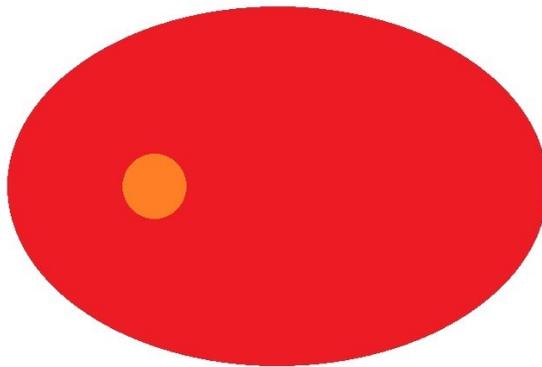
*Figura 2 Nomenclatura incendio*

La propagazione dell'incendio è soggetta a diversi fattori sia metereologici che relativi alla conformazione del terreno sul quale l'incendio si propaga.

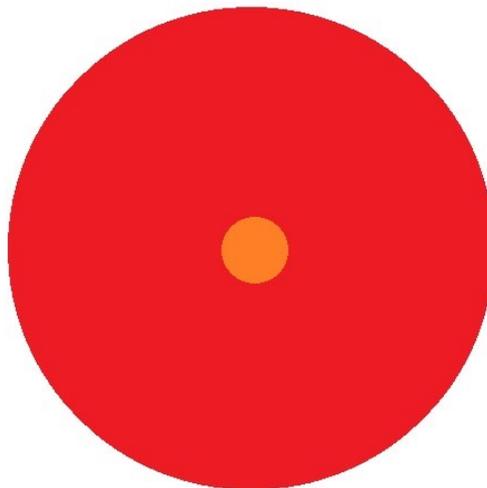
Gli effetti metereologici agiscono principalmente andando a modificare le caratteristiche del combustibile e della fiamma, tra i più rilevanti sono quelli riportati di seguito.

- *L'umidità relativa dell'aria*, che influisce sull'umidità del combustibile e quindi sulla sua infiammabilità. Quando il combustibile viene scaldato comincia una lenta essiccazione fino alla completa evaporazione di tutta l'acqua presente; finché tutta l'acqua non è evaporata la temperatura del combustibile non può superare i 100°C e raggiungere la "temperatura di accensione". Va da sé che più il combustibile è umido, maggiore sarà il tempo impiegato affinché tutta l'acqua evapori e si inneschi la combustione. Maggiore sarà l'umidità relativa dell'aria, più sarà umido il combustibile e più tempo ci vorrà perché la combustione abbia inizio. Minore sarà l'umidità relativa dell'aria, meno sarà umido il combustibile e meno tempo ci vorrà perché la combustione abbia inizio.

- Il *vento*, che ha due effetti sull'incendio: uno diretto sulla fiamma e uno sull'ambiente circostante. L'effetto diretto è dato dall'inclinazione della fiamma, che trovandosi più vicina al combustibile lo scalderà maggiormente, sia per convezione che per irraggiamento, velocizzando il raggiungimento della temperatura di accensione. L'effetto indiretto è invece quello che il vento ha sull'ambiente circostante spostando materiale combustibile all'interno della fiamma, alimentandola, e contribuendo all'essiccazione del materiale combustibile con una conseguente combustione più rapida.



*Figura 3 Fuoco propagato in piano in presenza di vento*



*Figura 4 Fuoco propagato in piano in assenza di vento*

- Eventuali *precipitazioni*, che influiscono direttamente sul quantitativo di acqua presente nel combustibile. È importante sottolineare come, a modificare i parametri, non sia tanto l'entità

della singola precipitazione quanto la distribuzione nel tempo delle precipitazioni nel loro insieme.

- La *temperatura dell'aria*, che influisce sull'umidità del combustibile (un aumento di 10°C dimezza l'umidità relativa dell'aria, una diminuzione di 10°C raddoppia l'umidità relativa (De Zorzi, et al., 2009)) e ne favorisce il riscaldamento.

Ci sono poi dei fattori legati alla struttura del terreno che però non sono stati presi in considerazione nell'applicazione in quanto la simulazione si svolge su un terreno pianeggiante.

### 1.3.4 Rischi

Durante l'azione di contenimento dell'incendio il volontario è esposto a due principali tipologie di pericoli: i *pericoli intrinseci* legati all'ambiente e alla situazione di rischio in cui opera ed i *pericoli derivanti dagli strumenti*. I pericoli intrinseci comprendono i pericoli derivanti dalle condizioni ambientali in cui si sviluppa l'incendio (tipo di vegetazione, pendenza del terreno e condizioni meteorologiche) e la tipologia di incendio, che definisce intensità e velocità di avanzamento delle fiamme e conseguente quantità di calore cui l'operatore è sottoposto.

Nei *pericoli derivanti dagli strumenti* rientrano invece tutti quei pericoli che scaturiscono da un uso scorretto degli strumenti, sia da parte dell'operatore stesso che dei suoi compagni.

Lo scenario presentato rappresenta quindi un caso emblematico in cui l'apprendimento di un'attività, in VR, risulta essere estremamente efficace, permettendo l'addestramento dell'operatore in una situazione di completa sicurezza e sotto la costante supervisione degli istruttori.

### 1.3.5 Possibili azioni di contenimento dell'incendio

Come visto in precedenza l'estinzione di una combustione è subordinata alla presenza contemporanea dei tre elementi che compongono il triangolo del fuoco: combustibile, comburente e calore. Il volontario può quindi agire per ridurre ed eliminare una di queste tre componenti al fine di contenere ed estinguere le fiamme.

### 1.3.6 Strumenti

Molti sono gli strumenti che l'operatore può utilizzare per estinguere un incendio; a partire da semplici strumenti manuali quali: pala, rastro e flabello, fino ad arrivare all'utilizzo di veicoli come elicotteri e Canadair. Nonostante l'avanzare delle tecnologie a disposizione dei vari Corpi, continuano però ad avere un ruolo fondamentale gli strumenti manuali, che nonostante la loro semplicità risultano essere molto efficaci e utili nella lotta al fuoco, anche considerato il fatto che il principio di lotta al fuoco non è mai cambiato e si basa da sempre sui principi visti in precedenza.

La scelta dello strumento è comunque subordinata alla tipologia e alla gravità dell'incendio ed al tipo di lavoro che occorre fare. Ogni strumento infatti agisce in modo diverso su una o più componenti del triangolo del fuoco.

Gli strumenti presi in esame nell'applicazione sono gli strumenti manuali, che sono gli strumenti più diffusi e normalmente più usati. Come già evidenziato in precedenza, questi sono strumenti che possono essere usati in incendi con fiamme alte al massimo 1m e con velocità non troppo elevate.

#### 1.3.6.1 Pala

La pala (Fig. 5) è uno strumento manuale che risulta essere estremamente versatile nell'azione di contenimento ed estinzione dell'incendio.



*Figura 5 Pala*

Può essere utilizzata con la parte piatta per agire direttamente sulla fiamma, soffocandola con un'azione detta di battitura, che riduce la superficie di materiale infiammabile esposto all'aria, oppure con la parte della lama per rimuovere materiale combustibile, creando linee tagliafuoco che

circoscrivono l'area di intervento. Durante l'utilizzo occorre fare attenzione a non aggiungere combustibile spostando zolle d'erba nelle fiamme o tentare di spegnerle coprendole con la terra, questo infatti può innescare un processo di pirolisi, che non ne assicura l'estinzione.

Data la sua struttura è da utilizzarsi prevalentemente su terreni con un combustibile fino, rado omogeneo o flessibile.

La pala è spesso usata in combinazione con altri strumenti come il rastro.

### 1.3.6.2 Rastro

Il rastro (Fig. 6) è uno strumento composto da un'asta in fondo alla quale sono montate delle lame di falciatrice a pettine; è molto efficace nell'azione di rimozione della lettiera e può essere usato negli incendi radenti per la creazione di linee tagliafuoco.



*Figura 6 Rastro*

### 1.3.6.3 Flabello

Il flabello (Fig.7) è uno strumento formato da un'asta con due impugnature (una fissa e una mobile) ed una massa battente all'estremità realizzata in materiale autoestinguente.



*Figura 7 Flabello*

Viene usato per effettuare un'azione di soffocamento della fiamma sui terreni più rocciosi dove l'effetto di una pala sarebbe poco efficace. Può comunque essere usato su terreni non rocciosi, nonostante, in queste situazioni, sia da preferire l'uso di una pala in quanto più efficace e versatile.

## 1.4 Scopo della tesi

L'obbiettivo primario dell'elaborato è stato quello di fornire uno strumento valido per la formazione del personale del Corpo dei Volontari Antincendi Boschivi della Protezione Civile del Piemonte.

Lo strumento realizzato si concentra principalmente sulla formazione ed il affinamento delle abilità del singolo volontario, sulla sua capacità di utilizzare i vari strumenti e di muoversi in un'area in cui è presente un incendio e sulla sua attenzione al rispetto delle norme di sicurezza; è inoltre pensata per fornire agli istruttori la possibilità di monitorare e correggere le cattive abitudini degli allievi.

Esso non è pensato per sostituire completamente l'addestramento sul campo, che rimane una parte fondamentale nella formazione dei volontari, ma consente di costruire solide basi nelle conoscenze del volontario, che potrà poi applicare il tutto nel caso reale, sfruttando i diversi vantaggi di un'esperienza in realtà virtuale. La possibilità di simulare un incendio virtuale porta con sé numerosi benefici, quali l'annullamento dei rischi a cui un operatore va incontro durante la gestione di un vero incendio, l'annullamento degli effetti dannosi che un incendio provoca sull'ambiente (si pensi per esempio ai fumi e gas liberati nell'aria durante un incendio) e la riduzione dei costi in termini di denaro e risorse umane richiesti per l'accensione e la gestione di un fuoco prescritto.

Più in particolare il lavoro di tesi illustrato nel presente documento si è incentrato: sulla realizzazione della logica di diffusione dell'incendio con lo scopo di ottenerne un modello realistico ed eseguibile in tempo reale in un'applicazione di VR, sullo sviluppo dei Personaggi Non-Giocanti o Non-Player Character (NPC) che supportano l'utente nelle sue attività, sulla realizzazione grafica degli ambienti e degli effetti visivi (fuoco, fumo e simili) e sull'ottimizzazione sia del codice che degli effetti grafici.

## 2 Stato dell'arte

### 2.1 Realtà Virtuale

Con VR si indicano quelle tecnologie che permettono all'utente di interagire con un mondo virtuale, sia esso simile o completamente diverso dal mondo reale. Secondo una definizione di Gregor Burdea del 1993 “la realtà virtuale è un'interfaccia uomo-computer di alto livello che comprende la simulazione in real-time di un mondo realistico e le molteplici interazioni con gli oggetti di tale ambiente attraverso canali sensoriali multipli”. In queste definizioni rientrano quindi non solo applicazioni che sfruttano tecnologie, quali visori e sensori di movimento, ma anche applicazioni desktop quali i videogiochi. La grande differenza tra le due esperienze è principalmente legata al livello di immersione offerto all'utente.

#### 2.1.1 Immersione e presenza

Con *immersione* si intende la capacità del sistema di realtà virtuale ad immergere l'utente all'interno di un mondo virtuale facendolo percepire come realistico. Ciò è ottenibile andando a circondare quanto più possibile l'utente con diverse tecnologie in grado di far percepire fisicamente all'utente tutti i vari stimoli provenienti dal mondo virtuale. Maggiore è il numero di canali sensoriali stimolati (vista, udito, tatto, ecc.) maggiore è il senso di immersione provato. L'immersività quindi è una misura della percezione di essere *fisicamente* presenti in un mondo virtuale.

Con *presenza* si intende un concetto simile all'immersione, che però nasconde in sé una grande differenza. Il senso di presenza è la sensazione *mentale* di appartenere veramente al luogo simulato ed è strettamente legata al concetto di “sospensione dell'incredulità”, definibile come la propensione di un individuo ad ignorare volontariamente le incongruenze presenti nel mondo virtuale al fine di godere ed empatizzare maggiormente con l'opera di fantasia propostagli. Il senso di presenza varia quindi da utente a utente e l'unica cosa che si può fare per aumentarlo è realizzare un mondo il quanto più possibile coerente e credibile.

Un sistema di addestramento in realtà virtuale deve riuscire a garantire un sufficiente livello di immersione e di presenza in modo che la tecnologia utilizzata non diventi un ostacolo allo scopo finale dell'applicazione. Se infatti l'utente dovesse percepire costantemente la sensazione di trovarsi

all'interno di un gioco o, peggio ancora, se non si sentisse minimamente parte della simulazione, questo influirebbe in modo negativo sull'effetto educativo del sistema.

### 2.1.2 Vantaggi e svantaggi dell'addestramento in VR

L'utilizzo della VR come strumento per l'addestramento del personale in situazioni pericolose risulta essere molto vantaggiosa. Essa, infatti, permette di abbattere i costi dell'addestramento, di ripetere l'addestramento quante volte si vuole indipendentemente da condizioni atmosferiche o di contorno, di rimuovere i pericoli derivanti dall'ambiente in cui si deve operare, di simulare situazioni altrimenti impossibili o difficili da replicare nel mondo reale e di semplificare il processo organizzativo dell'addestramento, il tutto impattando in modo minimale sull'esperienza finale. L'addestramento tramite strumenti VR può però presentare degli svantaggi prevalentemente legati alla tecnologia. L'utilizzo di visori e altri sensori può infatti rappresentare un elemento di complessità aggiuntivo nelle operazioni che l'utente deve svolgere, inoltre, non è sempre possibile, o può essere troppo complesso e svantaggioso, riuscire a replicare tutti gli stimoli che un utente nella situazione reale percepirebbe.

## 2.2 Strumenti di simulazione della propagazione del fuoco

Nel seguito saranno presentate varie applicazioni che rappresentano lo standard di riferimento nel loro ambito per quanto riguarda la propagazione di un fuoco in un ambiente naturale.

### 2.2.1 FlamMap

FlamMap è un'applicazione desktop (Fig. 8) per l'analisi degli incendi che nasce nel contesto del progetto "Fire, Fuel, Smoke Science" dei laboratori della stazione di ricerca di Rocky Mountain in Missoula, da parte dello sforzo congiunto della USDA (United States Department of Agriculture) e U.S Forest Service. Essa inizialmente era in grado di simulare il comportamento di un incendio, la sua crescita e diffusione, solo a condizioni ambientali (meteo e umidità del combustibile) costanti. Questi limiti sono stati superati quando è stata unita ad un'altra applicazione sviluppata negli stessi laboratori: FARSITE, la quale ha permesso la valutazione del comportamento di un incendio boschivo anche in condizioni variabili di terreno, meteo e umidità.

Nella simulazione vengono utilizzati un gran numero di modelli matematici per valutare i vari aspetti di diffusione del fuoco: innesco, propagazione a livello della chioma, spotting<sup>2</sup> e altri. Per funzionare, l'applicazione richiede l'utilizzo di un file di tipo *landscape* (.LCP), che contiene diversi *data layer* con tutte le informazioni geo spaziali del territorio che si vuole prendere in esame.

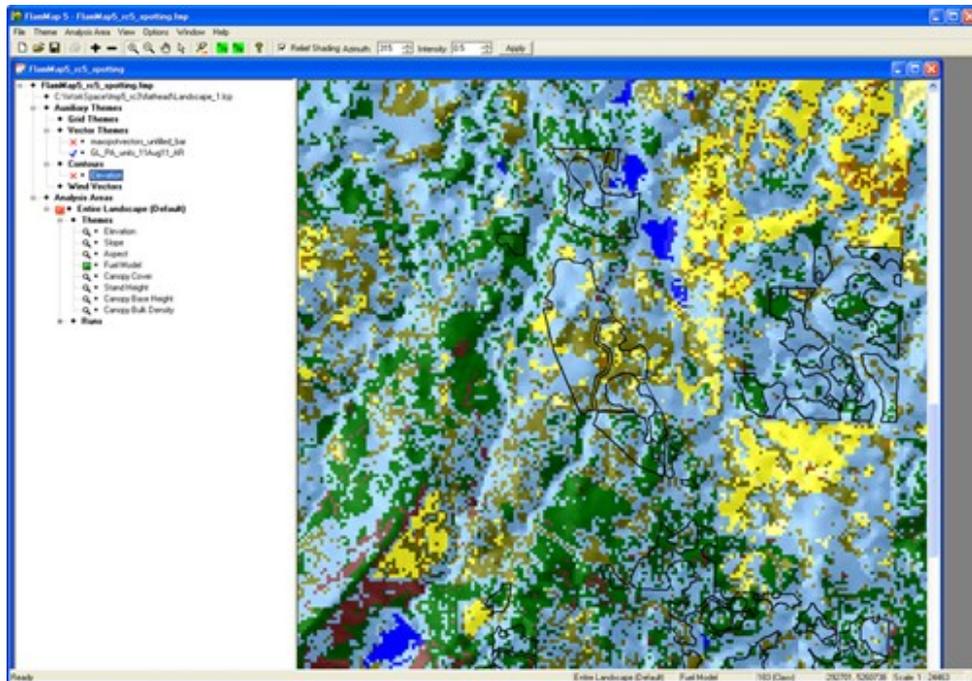


Figura 8 FlamMap - immagine dalla pagina dedicata del sito del progetto Fire, Fuel, Smoke ScienceProgram

Ottimo strumento di simulazione di incendi su larga scala, applica numerose variabili e tiene conto di numerosi aspetti ambientali durante la simulazione, permettendo uno studio accurato delle potenziali evoluzioni dell'incendio. La possibilità di applicare in tempo reale una simulazione così accurata e su larga scala è però subordinata ad una componente grafica non realistica, composta solamente da pixel colorati, che permette di reindirizzare lo sforzo computazionale interamente sulla valutazione delle equazioni di propagazione del fuoco.

## 2.2.2 Simtable

Simtable rappresenta uno dei più interessanti progetti di simulazione in realtà aumentata. Sviluppata e distribuita da Simtable LLC con sede in Santa Fe quest'applicazione consente, tramite l'uso di un

<sup>2</sup> Termine con cui si indica la nascita di un nuovo incendio a diversi chilometri dall'incendio principale per colpa di frammenti di materiale incandescente trasportati dal vento

tavolo pieno di sabbia (Fig. 9), di simulare un incendio su larga scala, studiarne gli effetti ed interagire con esso per conoscere le conseguenze che una determinata azione avrà sulla sua propagazione.

L'applicazione come detto è composta da un tavolo riempito di sabbia su cui può essere proiettata una mappa satellitare rappresentante il luogo in cui si vuole simulare la propagazione. Una volta proiettata la mappa è possibile spostare la sabbia presente sul tavolo in modo da ricreare le varie montagne ed il paesaggio coerentemente con la carta topografica sottostante. È possibile, a questo punto, iniziare una simulazione in tempo reale dell'incendio esattamente nell'ambiente che si è deciso di proiettare, con la possibilità di modificare in tempo reale le diverse variabili che definiscono come il fuoco si stia propagando. Le variabili sono numerose e tra queste troviamo: vento (intensità e direzione) e ora del giorno (agisce sull'esposizione al sole di un determinato versante).



*Figura 9 Simtable, un utente da inizio alla simulazione accendendo il fuoco con un accendino*

Con l'incendio avviato si può poi testare una particolare strategia per affrontarlo, disponendo in vari punti, sempre in tempo reale, diversi tipi di unità (aeree, di terra, ecc.) ed osservando l'effetto che le azioni adottate hanno sul suo contenimento.

È dunque un ottimo strumento che si concentra sulla simulazione di incendi su larga scala e che aiuta ad approfondire e migliorare le abilità di coordinamento delle varie squadre, piuttosto che sulle abilità del singolo operatore.

### 2.2.3 Far Cry 2

Far Cry 2 (Fig. 10) è un gioco sparattutto del 2008 sviluppato e distribuito da Ubisoft e diventato famoso per l'innovativo sistema con cui il fuoco si propaga all'interno dell'ambiente. Nonostante il principale scopo di questa applicazione sia l'intrattenimento e non una simulazione fisicamente

accurata, il risultato ottenuto dal gruppo di Jean-Francois Lévesque, principale responsabile del sistema di propagazione in Far Cry 2, fu estremamente realistico.

La principale innovazione che ha portato è rappresentata dal realismo con cui il fuoco si propaga in modo veritiero all'interno di un First Person Shooter (FPS), applicazione che richiede di mantenere un frame rate elevato mentre vengono renderizzati a schermo svariati elementi e mentre nell'ambiente vengono gestiti un gran numero di altri aspetti operativi. È necessario, infatti, controllare diverse intelligenze artificiali, i sistemi particellari, gli effetti grafici esterni a quelli del fuoco e molti altri calcoli non strettamente legati alla stessa simulazione dell'incendio. Chiaramente, per poter mantenere un frame rate sufficiente si è dovuto scendere a dei compromessi semplificando i modelli utilizzati. Il risultato finale è comunque essere estremamente valido, tanto da essere considerato ancora oggi una pietra miliare nel suo campo.

A proposito degli aspetti tecnici e dei compromessi che sono stati utilizzati, Jean-Francois Lévesque in un'intervista sul sito Gamasutra<sup>3</sup>, alla domanda: “Quali modelli e principi avete usato per determinare l'implementazione del fuoco?” ha risposto dicendo: “Per l'aspetto tecnico e la sua implementazione, ho letto molte ricerche. Hanno trovato numerose formule per simulare in modo molto realistico un incendio – il modo in cui i gas si comportano e come il fuoco si propaga in forme complesse. Sfortunatamente, quelle soluzioni raramente possono funzionare in applicazioni real-time e quando lo fanno, sono troppo lente per un FPS. Ho usato quelle ricerche come base, e ne ho smussato gli angoli per semplificarne l'aspetto matematico e fisico. Dopotutto, il risultato non doveva essere un gioco di simulazione di incendi, ma un gioco al cui interno è presente un fuoco che si propaga. Ritenevo di poter dire che sarebbe stato un successo se il giocatore lanciando una Molotov nell'erba alta avesse detto a sé stesso ‘Bello. Se lo avessi fatto nel mondo reale, sarebbe plausibile che il fuoco si diffondesse in un modo simile.’”

La sfida affrontata dagli sviluppatori di Ubisoft risulta essere molto simile a quella affrontata nella realizzazione dell'applicazione oggetto di questo lavoro di tesi, in cui vi è stata la necessità di gestire un grande quantitativo di sistemi particellari e fare in modo che il fuoco si comportasse in modo realistico mantenendo però il numero di frame al secondo elevato per garantire che la simulazione in VR risultasse fluida nel suo utilizzo.

---

<sup>3</sup> [https://www.gamasutra.com/view/news/111851/Interview\\_How\\_Far\\_Cry\\_2s\\_Fire\\_Fuels\\_Spreads.php](https://www.gamasutra.com/view/news/111851/Interview_How_Far_Cry_2s_Fire_Fuels_Spreads.php)



*Figura 10 Far Cry 2*

I numerosi aspetti che Far Cry 2 ha in comune con l'applicazione realizzata lo rendono un ottimo punto di riferimento per quanto riguarda la resa realistica della simulazione pur mantenendo le prestazioni dell'applicazione elevate.

#### 2.2.4 FLAIM

FLAIM è un'applicazione VR progettata da James Mullins. Nasce nel 2017 alla Daikin University nello stato di Victoria, in Australia, dove Mullins è professore, in seguito al sempre maggiore numero di incendi sviluppatasi nel paese.

FLAIM permette l'addestramento dei vigili del fuoco all'uso di una pompa per l'acqua (Fig. 11) in diverse situazioni, sfruttando un visore e un sensore, posto all'estremità di uno strumento che ricrea l'impugnatura tipica di una manichetta antincendio (Fig.12). Il sistema è anche in grado di far percepire vari stimoli all'utente come il calore (fino a 100°C) grazie ad un particolare giubbino e come la forza generata dal passaggio dell'acqua nel tubo utilizzando un'apposita struttura munita di attuatori, che si attivano quando l'utente simula l'apertura della manichetta per erogare acqua sulle fiamme.

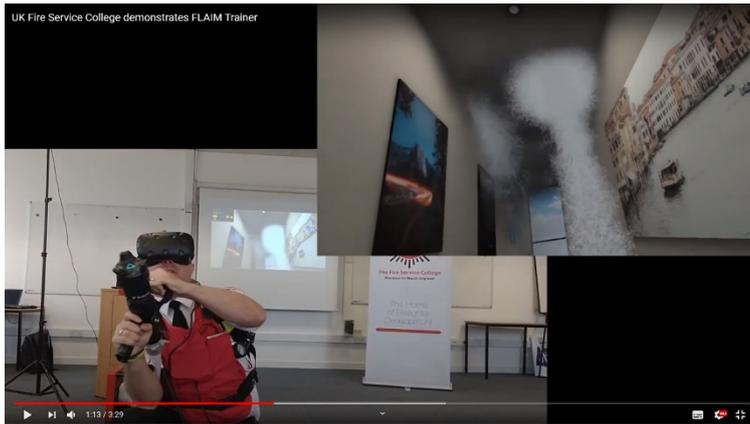


Figura 11 Un utente che usa FLAIM – immagine tratta del video [https://www.youtube.com/watch?v=B\\_DRZGkoejY&t=104s](https://www.youtube.com/watch?v=B_DRZGkoejY&t=104s) al minuto 1:13



Figura 12 Equipaggiamento FLAIM Systems

L'applicazione fornisce vari scenari in cui è possibile esercitarsi (aeroporto, parco, ecc.) e presenta una versione pensata per utenti privati e mirata all'addestramento all'uso degli estintori.

Risulta anche molto interessante la possibilità di far provare sensazioni quali il calore all'utente. Questo, unito alla possibilità di maneggiare una replica esatta dello strumento reale garantisce un elevatissimo senso di immersione e di realismo.

Anche nell'applicazione realizzata per il progetto di tesi è presente il concetto di fisicità degli strumenti e, nonostante la possibilità di far percepire sensazioni particolare all'utente rimanga un campo inesplorato e di miglioramento, la possibilità di muoversi nell'ambiente reale senza vincoli o sistemi quali il teletrasporto (utilizzato invece nell'applicazione FLAIM) consente di garantire un livello di immersione paragonabile a quello fornito dal sistema ideato da Mullins.

## 2.2.5 Addestramento in realtà virtuale per i vigili del fuoco

L'applicazione simula una situazione di incendio nella una scuola media Mascagni di Melzo causato da un terremoto. Lo scopo è quello di riuscire a mettere in salvo un certo numero di studenti rimasti intrappolati all'interno della struttura, prima di procedere all'estinzione delle fiamme per mezzo di un estintore (Fig. 13). Nello svolgimento delle operazioni l'utente viene cronometrato e, al termine della simulazione, gli viene assegnato un punteggio. L'applicazione, realizzata come progetto di tesi magistrale da Fabrizio Corelli del Politecnico di Torino, presenta tre diverse versioni: una versione desktop, una in VR con locomozione tramite controller e una in VR tramite pedana omnidirezionale KatWalk. In tutte le versioni il compito è lo stesso, cambia solamente il metodo di locomozione.



*Figura 13 simulazione del fuoco nella sala computer*

Nonostante l'applicazione non presenti una grafica particolarmente immersiva, la possibilità di scegliere tra molti sistemi di locomozione e la presenza di un tabellone dei punteggi, che incentiva gli utenti a migliorarsi tramite la competizione, la rendono un sistema di apprendimento versatile ed estremamente coinvolgente oltre che efficace ai fini dell'apprendimento. Nonostante i vari sistemi di locomozione siano validi, nessuno di quelli presenti lascia la libertà necessaria all'utente, per questo si è deciso di utilizzare un diverso sistema di locomozione più immersivo e realistico. La simulazione della situazione di rischio è valida, ma non è stato realizzato un sistema di propagazione del fuoco nella struttura, questo infatti reagisce unicamente ai tentativi di spegnimento tramite estintore.

## 2.2.6 KIMM simulator

Nell'articolo "A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data" pubblicato sulla rivista Fire Safety Journal (Moohyun Cha, 2012) è presentato un lavoro svolto da quattro studiosi coreani su una delle quattro esperienze di addestramento offerte dal simulatore "KIMM Simulator" sviluppato dalla Korea Institute of Machinery and Materials. Il contesto realizzato rappresenta un incidente automobilistico in galleria, che porta all'innescò e conseguente

diffusione di un incendio. In quest'applicazione, grazie alla presenza di uno scenario prestabilito, si è utilizzato Fire Dynamics Simulator (FDS) per pre-calcolare la simulazione dell'incendio in modo molto accurato.

Oltre all'aspetto educativo dell'esperienza l'altro aspetto preso in considerazione è quello della manipolazione dei dati forniti da FDS per ottimizzarli e adattarli all'uso di un'applicazione in tempo reale. In particolare, i risultati dei calcoli effettuati da FDS sono stati utilizzati per generare una griglia tridimensionale tramite un algoritmo di divisione degli spazi Octree, a sua volta utilizzata per applicare diversi livelli di dettaglio (Level of Detail, LOD) al rendering del fumo e del fuoco volumetrico, successivamente selezionati in base alla distanza dell'utente da un punto nello spazio, comportando però la generazione di un quantitativo di dati talmente esteso che gli studiosi hanno dovuto studiare un sistema di bufferizzazione apposito per poterli gestire.

Questo studio mette in luce le criticità e gli enormi sforzi computazionali ad oggi necessari per realizzare un'applicazione VR in tempo reale in cui la propagazione dell'incendio si basi su formule e algoritmi di Computational Fluid Dynamics (CFD). La valutazione della propagazione è effettuata a priori e si basa su una situazione prestabilita, le cui condizioni non possono variare in tempo reale fornendo quindi una simulazione accurata ma poco variabile, con la conseguente possibilità che l'utente impari a risolvere la simulazione in sé e non a gestire la situazione di pericolo. Per questo motivo, invece, nell'applicazione discussa nel presente lavoro di tesi si è preferito implementare un sistema di propagazione *ad hoc*, che permettesse di cambiare le condizioni della simulazione sia in tempo reale durante la simulazione, sia ad ogni simulazione.

## 3 Tecnologie utilizzate

Nel seguito saranno presentate le varie tecnologie software e hardware utilizzate per lo sviluppo dell'applicazione.

### 3.1 Unity

Unity è un motore grafico multiplatforma gratuito sviluppato dalle Unity Technologies (Fig. 14), che nasce nel 2005 con l'obiettivo di rendere più accessibile il mondo dello sviluppo di videogiochi; inizialmente fu rilasciata solo per Mac OS X e solo successivamente per Windows.

Unity consente di realizzare applicazioni 2D e 3D sia desktop che per realtà virtuale ed aumentata; è utilizzato in diversi ambiti, non solo nello sviluppo di videogiochi, ma anche nella realizzazione di altre applicazioni interattive e di intrattenimento come, per esempio, cinema e visualizzazione architettoniche. Il suo grande successo è dovuto al fatto che semplifica molto il processo di sviluppo permettendo di gestire molti degli aspetti di progettazione direttamente al suo interno. È per esempio possibile controllare le sorgenti audio, modificare gli ambienti sia 3D che 2D, animare personaggi e macchinari, modificare e creare shader, impostare le luci, scegliere effetti di post processing.

Una caratteristica molto interessante offerta da Unity è la possibilità di utilizzare nel proprio progetto degli asset realizzati da altri utenti o da aziende. Questi prendono il nome di package e altro non sono che collezioni di file, script e oggetti che servono a realizzare una particolare funzionalità.

All'interno del nostro progetto è stato utilizzato ObiRope, precisamente nella sua versione 4.1, per ricreare i battenti del flabello, Bézier Path Creator per la gestione di curve e percorsi e Animation Rigging per la gestione delle animazioni dei vari NPC.

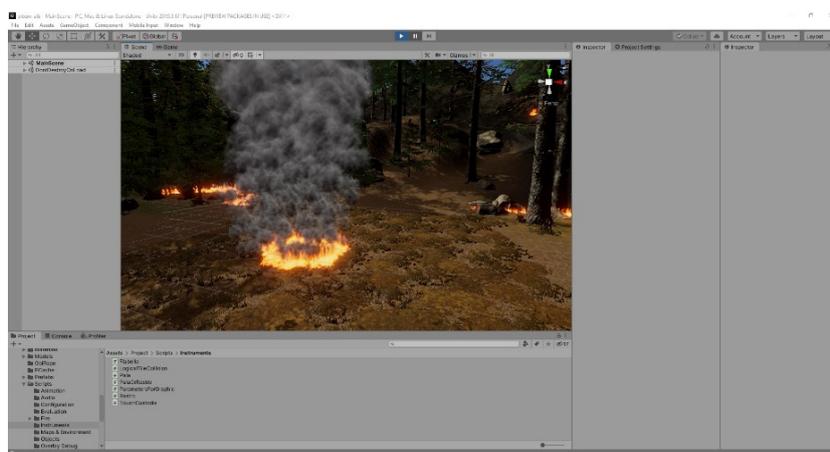


Figura 14 Interfaccia grafica di Unity

### 3.1.1 Obi Rope

ObiRope (Fig. 15) è sviluppato dalla Virtual Method ed è una parte del più grande pacchetto Obi che permette di simulare diversi tipi di materiali e oggetti. ObiRope, in particolare, consente di creare e simulare fisicamente funi ed aste in modo semplice ed efficiente tramite l'utilizzo di curve di Bézier.

Lungo la curva vengono generate una serie di particelle utilizzate come punti di controllo per la simulazione. Queste possono essere editate singolarmente (fissate, ridimensionate, ecc.) sia per modificare l'aspetto della corda/asta sia per ottenere l'effetto desiderato dalla simulazione, la quale non sfrutta la normale fisica implementata in Unity, bensì una propria versione personalizzata e ottimizzata specificatamente per questo sistema.

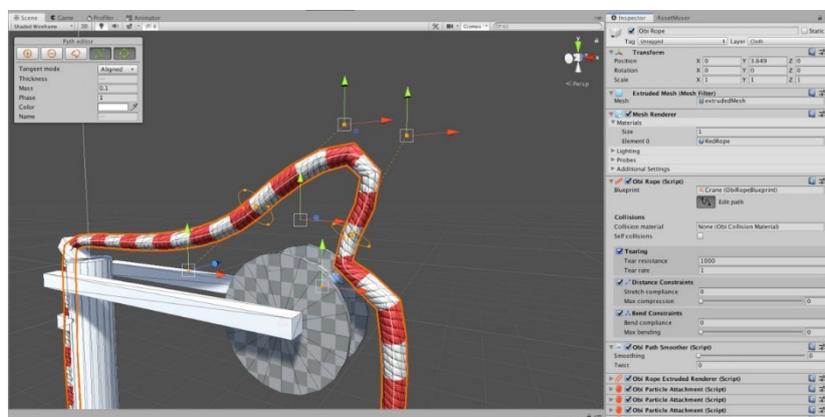


Figura 15 ObiRope - immagine tratta dall'asset store di Unity  
<https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/obi-rope-55579>

### 3.1.2 Bézier Path Creator

Bézier Path Creator è un *asset* realizzato da Sebastian Lague; realizza un sistema grafico e intuitivo per la generazione e gestione di curve di Bézier. L'*asset* fornisce una serie di script, che permettono di visualizzare e modificare i punti di controllo della curva direttamente all'interno dell'editor di Unity; sono forniti inoltre un certo numero di script che svolgono alcune funzioni di base sulle curve come la generazione di oggetti lungo la curva o la possibilità di far seguire ad un oggetto il percorso tracciato.

### 3.1.3 Animation Rigging

L'Animation Rigging è un *package* realizzato e distribuito da Unity, che consente di impostare e realizzare movimenti procedurali su vari oggetti e personaggi. Tramite l'utilizzo di predefiniti vincoli si può generare un *rig*<sup>4</sup> di controllo per manipolare un personaggio o un oggetto e farlo interagire con l'ambiente circostante in tempo reale (Hunt & Eakes, 2019).

Utilizzando l'Animation Rigging è stato possibile modificare le animazioni presenti nell'applicazione, sviluppate in un altro software apposito, per adattarle alle varie situazioni. Inoltre, il *package* ha permesso di semplificare il lavoro di animazione, rendendolo più flessibile e intuitivo. In particolare, Animation Rigging è stato usato per posizionare correttamente gli arti superiori dei Personaggi Non-Giocanti in modo da fargli impugnare e usare correttamente gli strumenti. È stato così possibile, per esempio, utilizzare una sola animazione per la camminata adeguandola in seguito al tipo di strumento trasportato. L'applicativo è stato usato anche per muovere testa e busto in modo da far seguire con lo sguardo, all'NPC, il giocatore nelle prime scene in cui un l'NPC impersonante un istruttore spiega all'utente i compiti che dovrà svolgere.

## 3.2 Software di supporto

Nonostante Unity sia molto versatile, per garantire una migliore qualità del prodotto finale e per svolgere quelle attività che non possono essere realizzate direttamente nel motore grafico, spesso occorre utilizzare software di supporto che siano stati specificatamente sviluppati per lo scopo che si vuole ottenere. Per esempio, conviene usare software specifici per la modellazione degli oggetti 3D o programmi appositi per la programmazione della logica che supporta l'applicazione.

### 3.2.1 Visual Studio

Visual Studio è un ambiente di sviluppo integrato (Integrated development environment, IDE) sviluppato da Microsoft. Si fonda sulla piattaforma .NET (realizzata sempre da Microsoft) per fornire diverse funzionalità come la programmazione multi-linguaggio, l'interoperabilità, la possibilità di sviluppare su e per piattaforme diverse (Wikipedia, 2020).

---

<sup>4</sup> Insieme gerarchico di ossa, connesse tra loro, utilizzato per mettere in posa ed animare una mesh.

Visual Studio è stato scelto in quanto molto ben integrato con Unity: è infatti l'IDE proposto anche dal Game Engine stesso. Ciò consente, oltre alla normale funzione di scrittura del codice, di utilizzare le librerie interne di Unity e di debuggare il codice scritto direttamente all'interno del motore grafico.

Nello sviluppo della nostra applicazione, Visual Studio è stato utilizzato per scrivere in C# tutti gli script e per testare il loro funzionamento al fine di rifinirne i dettagli e migliorarne le performance.

### 3.2.2 Blender

Blender (Fig. 16) è un software gratuito sviluppato dalla Blender Foundation, che supporta tutti gli aspetti della pipeline 3D (modellazione, rigging, simulazione, rendering, compositing e motion tracking).

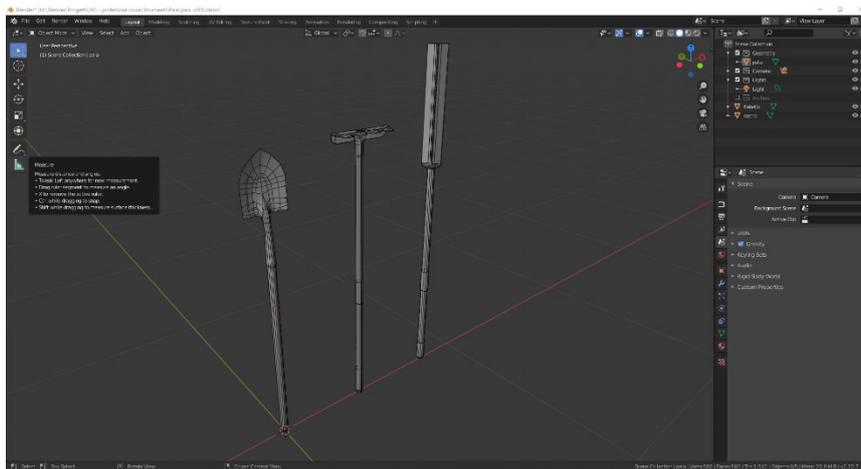


Figura 16 Blender

Nasce da Ton Roosendaal, co-fondatore nel 1988 della nota compagnia NeoGeo. Nel 1995 Ton fondò una nuova compagnia, Not A Number (NaN), con l'obiettivo di rilasciare quello che sarebbe dovuto diventare Blender: un software di sviluppo gratuito, ma con una versione a pagamento per chi avesse voluto usarlo per la pubblicazione dei propri progetti a fini commerciali. Il progetto naufragò a causa di cattivi investimenti ed il ritiro degli investitori portò la compagnia a fallire; nonostante questo continuò però ad essere supportato dalla community, supporto che si concretizzò successivamente in una campagna di raccolta fondi dal nome "Free Blender", che riuscì a raccogliere una notevole somma e a convincere gli investitori a tornare ad investire sul progetto con l'obiettivo, questa volta, di sviluppare un software completamente gratuito. È così che nel 2005 venne rilasciato il primo Open Movie, film d'animazione realizzato con software completamente gratuiti e di cui tutti gli asset sono pubblicati online con licenza Creative Commons (Blender History, s.d.). Oggi Blender è arrivato alla

sua versione 2.8, la stessa utilizzata nel progetto di tesi per realizzare i vari strumenti e Personaggi Non-Giocanti presenti.

### 3.2.3 GIMP

GIMP (GNU Image Manipulation Program) è un software libero multiplatforma per l'elaborazione digitale delle immagini (GIMP, 2020).

GIMP nasce nel 1995 come progetto universitario da Spencer Kimball e Peter Mattis.

Nel 1996 viene rilasciata una prima versione (0.54) che presenta delle criticità, ma mostra le potenzialità del progetto. I due studenti decidono quindi di continuare il progetto e nel 1998 rilasciano la versione 1 di GIMP. Da allora il programma continua ad essere migliorato ed evoluto fino alla versione attuale 2.10, usata anche in questo lavoro di tesi.

GIMP, la cui interfaccia è mostrata in Fig. 17, supporta una vasta gamma di spazi di colore (RGB, HSV, CMYK), dispone di molti strumenti, maschere ed effetti per modificare e creare immagini, supporta sin dalla sua nascita i plug-in cosicchè ognuno possa aggiungere funzionalità al programma. Nel lavoro di tesi svolto è stato usato questo software in particolare per realizzare e modificare varie texture utilizzate all'interno dell'applicazione.

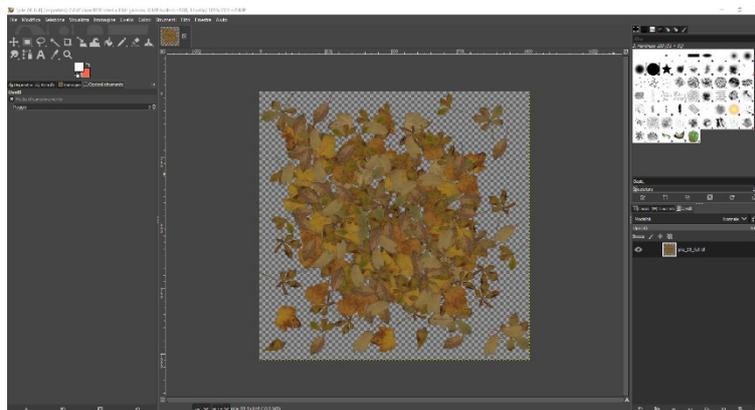


Figura 17 GIMP

### 3.3 HTC Vive

L'HTC vive è un visore per la realtà virtuale progettato e prodotto da Valve in collaborazione con HTC. Fu presentato nel 2015 e rilasciato al pubblico nel 2016.

Il sistema base è composto da un Head-Mounted Display (HMD), da sensori per il tracciamento dell'utente, chiamate base stations, e da due controller usati per interagire con l'ambiente virtuale. Al sistema base possono essere aggiunti dei sensori utilizzabili per tracciare oggetti nell'ambiente.

Nel progetto è stato utilizzato in particolare un HTC Vive Pro munito di tre sensori per il tracciamento dei polsi e degli strumenti.

### 3.3.1 Head-Mounted Display

Un Head-Mounted Display (HMD, Fig. 18) è uno schermo che può essere indossato direttamente sulla testa dall'utilizzatore. Nel caso dell'HTC Vive Pro questo è composto da due schermi AMOLED con risoluzione 1440x1600 pixels (risoluzione totale 2880x1600 pixels) e con una frequenza di aggiornamento di 90Hz. I valori di *field of view* presenti sul sito del prodotto riportano 110 gradi sia in orizzontale che in verticale. Nel casco sono presenti anche diversi sensori: un accelerometro, un giroscopio, sensori per il rilevamento della distanza inter-pupillare (IPD) e due telecamere che insieme ad altri sensori permettono il tracciamento. Inoltre, sull'HMD del modello pro sono integrate due cuffie sovra-aurali, non presenti sui modelli precedenti.

La versione cablata di questo HMD si collega al computer tramite l'apposita scatola di collegamento a cui vanno connessi: un connettore Display Port per connetterlo alla scheda video, un cavo USB e il cavo di alimentazione. Nella versione finale del progetto viene utilizzata la versione wireless, che lascia più libertà di movimento all'utente.

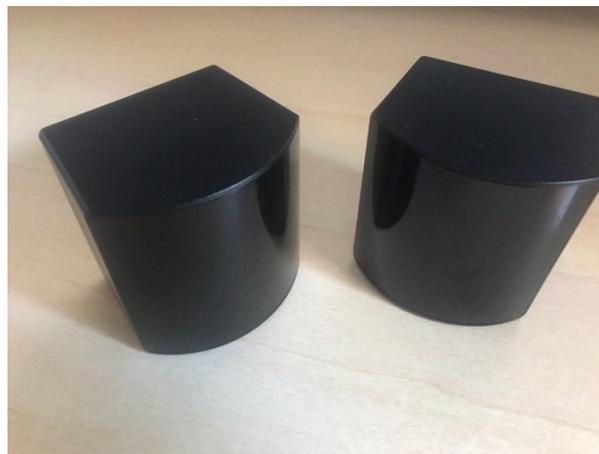


Figura 18 Head Mounted Display

### 3.3.2 Base station 2.0

Le base station (Fig. 19) sono sensori ottici che emettono fasci di luci infrarossi per tracciare il movimento del casco e dei controller nello spazio. Vanno disposte a due angoli opposti della stanza quanto più possibile sollevate da terra in modo che l'utente non si frapponga tra esse interrompendo il tracciamento.

Essendo sensori ottici possono soffrire di interferenze date dalla troppa luce nella stanza e dalla presenza di altre fonti di luci infrarossi. Dalla versione 2.0 è possibile utilizzare fino a 4 base station contemporaneamente per aumentare l'area di tracciamento fino ad un massimo di 10m x 10m.



*Figura 19 Base stations*

### 3.3.3 Controller

I controller (Fig. 20) sono uno dei mezzi tramite cui un utente può interagire con l'ambiente virtuale. Essi possono essere impugnati dall'utente, offrono sei gradi di libertà e sono provvisti di numerosi pulsanti che permettono l'effettiva interazione con gli oggetti puntati.



*Figura 20 Controller*

Si è preferito, in questo lavoro, non usare i controller per tracciare il movimento delle mani, optando per l'utilizzo di due sensori legati ai rispettivi polsi; questo consente all'utente di avere le mani libere e poter impugnare lo strumento che deve utilizzare senza ostacoli.

### 3.3.4 Sensori (Tracker)

I tracker (Fig. 21) sono accessori che possono essere montati su qualsiasi oggetto tramite una vite a passo fotografico da  $\frac{1}{4}$  di pollice, in modo da essere successivamente usati per tracciare tale oggetto nel mondo virtuale. Sono provvisti di un solo pulsante per l'accensione e per lo spegnimento, quindi non sono pensati per essere utilizzati come controller veri e propri.



*Figura 21 Tracker*

## 4 Progettazione

Fase molto importante dello sviluppo dell'applicazione, la progettazione prevede lo studio dei requisiti necessari ed un'analisi su come questi vadano introdotti nel modo più efficace possibile, al fine di garantire il livello di qualità più alto possibile del prodotto finale e di poter organizzare efficacemente il lavoro. Questo processo comincia con l'acquisizione del materiale di interesse per lo studio dei requisiti e termina con la produzione di uno *storyboard*, documento che descrive le scelte di design che si sono definite.

### 4.1 Acquisizione del materiale

L'acquisizione del materiale comporta la raccolta di quante più informazioni possibili così da riuscire a definire quali siano esattamente gli aspetti chiave che devono comparire nell'applicazione.

In questo caso, il processo di acquisizione è cominciato con una riunione al Centro di formazione dell'AIB Piemonte, a Peveragno, dove è stato illustrato il modo in cui avviene il corso teorico ed il relativo materiale cartaceo e digitale. Sono stati mostrati, inoltre, i vari strumenti in uso ai volontari ed è stata fornita una breve dimostrazione del loro utilizzo. Questo primo incontro ha permesso di iniziare ad abbozzare delle idee e di capire quali fossero alcuni degli aspetti principali. Con più informazioni a riguardo e con la possibilità di proporre alcune idee, sono stati organizzati altri incontri in cui, con domande mirate, esposizione e discussione dei progetti ipotizzati, si sono delineati quali fossero gli elementi fondamentali da inserire nella simulazione, quelli marginali e quali ancora da scartare. È stato quindi grazie alle informazioni fornite e al continuo confronto avvenuto con i responsabili dell'AIB che si è potuto procedere con la definizione dello *storyboard*.

### 4.2 Storyboard

Una volta definito cosa effettivamente fosse necessario implementare nel prodotto finale si è passati a discutere come questi elementi dovessero essere presentati; dal risultato di questo lavoro deriva la definizione dello storyboard. In particolare, la struttura generale dell'applicazione, i cui aspetti saranno trattati dettagliatamente nei paragrafi successivi, è la seguente. All'avvio, l'utente potrà, navigando in un menu, scegliere i vari elementi dell'esperienza: lo strumento che intende usare, le caratteristiche dell'incendio, la modalità di addestramento. In questa fase è possibile assistere anche

ad una spiegazione delle varie modalità in VR e si può cominciare a prendere confidenza con il sistema. Effettuate le scelte verrà caricata la scena di effettivo svolgimento della simulazione nella quale, a seconda della modalità selezionata, si potrà affrontare l'incendio oppure intraprendere un addestramento sull'uso dello strumento selezionato. Inoltre, in tutte le fasi l'utente è guidato da una voce fuori campo che indica cosa occorre fare.

## 4.3 Interazioni con l'applicazione

All'interno dell'applicazione le interazioni possibili con prevedono: la possibilità di muoversi nell'ambiente e l'interazione, tramite gli strumenti, con il fuoco ed il terreno. Nel seguito saranno discusse le scelte di design effettuate all'interno dell'applicazione per quanto concerne questi aspetti.

### 4.3.1 Uso degli strumenti

Al fine di ottenere il livello di immersività più alto possibile, si è deciso di far impugnare all'utente una replica degli strumenti utilizzati nelle attività di spegnimento degli incendi. Questa scelta ha comportato la necessità di tracciare tramite un apposito sensore la posizione dello strumento e di rimuovere all'utente la possibilità di impugnare ed utilizzare i controller normalmente adoperati.

Nonostante la mancanza dei controller e limitando quindi le interazioni possibili al solo utilizzo degli strumenti realizzati, la possibilità di maneggiare lo strumento reale permette non solo di aumentare moltissimo la sensazione di presenza dell'utente, ma anche di abituare il volontario all'uso degli effettivi strumenti che userà nello scenario reale aumentando il livello di apprendimento fornito dall'applicazione.

### 4.3.2 Locomozione

Per muoversi all'interno di un'applicazione VR esistono diverse tecniche ben consolidate, tra le quali spiccano:

- *arm swinging*, tecnica che prevede l'oscillazione delle braccia come se si stesse camminando impugnando i controller in entrambe le mani. Il movimento dei controller permette di muoversi in avanti nella direzione in cui si sta guardando;

- *teleporting*, tecnica che permette il movimento dell'utente tramite teletrasporto in punto indicato tramite l'uso del controller;
- *room scaling*, con questa tecnica il movimento dell'utente nell'ambiente reale è tracciato, tramite l'ausilio di appositi sensori, e mappato nelle coordinate del mondo virtuale; questa tecnica è estremamente immersiva in quanto permette all'utente di muoversi nell'ambiente virtuale esattamente come farebbe in quello reale; limita tuttavia il movimento nell'ambiente virtuale alle dimensioni della stanza nel mondo reale in cui l'utente si sta fisicamente muovendo.

Con l'obiettivo di aumentare il più possibile l'immersività dell'applicazione e parzialmente costretti dalla scelta di far usare all'utente una replica reale dello strumento si è deciso di utilizzare il "room scaling". In particolare, si è deciso di realizzare una stanza di 10m x 10m (massima estensione di tracciamento per la tecnologia da noi utilizzata) sia nel mondo reale sia in quello virtuale, all'interno della quale l'utente potesse muoversi. La stanza reale è situata al Centro di formazione di Peveragno.

## 4.4 Modalità

Sono state previste due modalità: guidata e valutata.

Nella modalità denominata guidata l'utente verrà istruito sul corretto uso dello strumento selezionato tramite istruzioni e informazioni impartitegli da due voci fuori campo. La scelta di usare due voci diverse è stata effettuata per rendere chiaro quali fossero informazioni teoriche e quali invece istruzioni da seguire per progredire nella simulazione. Questa modalità è stata pensata sia con lo scopo di fornire nozioni, sia per dare la possibilità, a quegli utenti che non avessero mai utilizzato un sistema VR, di prendere confidenza con quest'ultimo cosicché un'eventuale inesperienza nell'uso della tecnologia non risultasse in un ostacolo ulteriore per l'utente. In questa modalità il fuoco non si propaga e serve anch'esso per far prendere confidenza all'utente con le varie interazioni possibili e le relative risposte che il sistema fornisce ad esse. Sono presenti, inoltre, solo NPC che svolgono animazioni a scopo dimostrativo delle corrette procedure di utilizzo degli strumenti e non sono invece presenti NPC che interagiscono attivamente con l'utente. Nello svolgimento delle operazioni richieste sono visualizzate delle specifiche icone che servono a segnalare un errore commesso. Per assicurarsi che l'utente abbia svolto correttamente i compiti che gli vengono affidati è presente un controllo, invisibile all'utente, che impedisce la prosecuzione delle operazioni finché queste non vengono svolte

nel modo richiesto. In questa modalità non viene assegnato alcun punteggio alla prestazione realizzata.

Nella modalità valutata l'utente si troverà invece ad affrontare, con l'aiuto di due NPC, un incendio che si diffonde in modo realistico all'interno dell'area prevista per la simulazione. Poiché questa modalità è pensata per valutare le conoscenze e le abilità apprese dall'operatore, non viene fornita alcuna informazione su come comportarsi e, al termine dell'esperienza, viene visualizzata una valutazione oggettiva dell'attività svolta. Essendo questa l'unica modalità in cui è presente l'incendio vero e proprio sarà quella principalmente tratta all'interno dell'elaborato.

#### 4.4.1 Valutazione dell'operatore

Analizzando il materiale fornito riguardo alle operazioni che un volontario deve eseguire, nell'azione di contenimento dell'incendio si sono potute delineare le attività principali in cui l'intera attività di spegnimento si può scomporre.

In modalità guidata ogni fase è analizzata e presentata nel dettaglio all'utente, dopo di che per ognuna di esse viene chiesto all'operatore di svolgere un'attività specifica per verificare l'apprendimento delle nozioni che gli sono state fornite. Se al termine dell'attività l'utente non dimostra di saper applicare quanto spiegato, le informazioni gli saranno ripetute e l'attività dovrà essere svolta nuovamente. Inoltre, non sarà possibile passare allo studio della fase successiva sino a che non si sarà superata quella attualmente attiva. In ogni caso, il passaggio alla fase successiva è subordinato al volere dell'utente, che segnala la volontà di procedere entrando in una regione illuminata (un cerchio/cilindro verde) indicante l'area di inizio della fase successiva; questa regione, però, apparirà solo previo corretto svolgimento dell'attività proposta.

In modalità valutata ogni fase viene rilevata in modo dinamico e invisibile all'utente, tramite il riconoscimento di determinate posizioni dell'utente nell'ambiente (distanza dal fuoco) e dell'utente rispetto allo strumento (lo impugna con due mani, con una sola, ecc.). L'utente potrà così concentrarsi meglio sul compito da svolgere senza distrazioni o interruzioni.

Le varie fasi in cui l'azione dell'utente si articola sono illustrate di seguito.

- *Trasporto*: fase in cui l'operatore si avvicina all'incendio trasportando in mano lo strumento scelto. Una scorretta impugnatura dello strumento potrebbe provocare lesioni sia

all'operatore, nel caso in cui inciampando dovesse cadere sull'utensile, sia ai suoi colleghi, nel caso in cui dovesse urtarli. Per dimostrare l'apprendimento di questa fase, in modalità guidata sarà chiesto all'utente di seguire un percorso identificato da un cerchio/cilindro in movimento, impugnando correttamente lo strumento. L'attività dura trenta secondi, al termine dei quali se lo strumento non è stato trasportato come indicato dalla voce guida si dovrà ripetere l'operazione.

- *Rimozione custodia*: attività richiesta solo per quegli strumenti provvisti di custodia, nel caso in esame rastro e flabello. La rimozione della custodia è fondamentale perché lo strumento possa essere utilizzato: dimenticarsi di rimuoverla è molto grave in quanto ci si troverebbe di fronte al fronte di fuoco senza poter agire in nessun modo. Per rimuovere la custodia l'operatore dovrà abbassarsi poggiando lo strumento al suolo e toccarne la punta. Questa operazione, in modalità guidata, è controllata all'uscita dell'utente da un'apposita zona di controllo: se la custodia dovesse risultare ancora inserita verrà richiesto di ripetere l'operazione.
- *Distanza di sicurezza*: è importante mantenere una corretta distanza di sicurezza dal fuoco prima di iniziare ad utilizzare lo strumento, l'eccessiva vicinanza alle fiamme potrebbe provocare ustioni. La corretta distanza di sicurezza è valutabile poggiando la punta dello strumento a terra di fronte al fuoco, mantenendo la schiena dritta e il braccio teso a formare una linea ideale di congiunzione tra spalla e fuoco. In modalità guidata verrà richiesto all'utente di recarsi ad un'ipotetica area di intervento e di valutare la distanza di sicurezza da essa; l'utente dovrà quindi poggiare la punta dello strumento a terra a questo punto avrà del tempo per assumere la posizione corretta, che verrà successivamente valutata; nel caso questa risulti scorretta, l'operatore dovrà ripetere l'attività.
- *Utilizzo*: dipende dal tipo di strumento che si sta usando e viene valutata controllandone l'efficacia e la corretta postura durante l'utilizzo. In modalità guidata è dato il tempo all'utente di prendere confidenza con lo strumento scelto.

## 4.5 Ambientazione

Non è stato richiesto che venisse replicato nessun luogo reale; le richieste si sono limitate al tipo di ambientazione che doveva rappresentare un bosco tipico delle zone piemontesi.

L'ambiente (Fig. 22) è composto da un'area pianeggiante tra le montagne. Sono presenti due linee di fuoco e parte della zona è priva di vegetazione e completamente annerita. L'area priva di vegetazione è separata da due linee di fuoco (che lambiscono l'area di azione dell'utente) ad indicare che l'incendio su cui si sta andando ad agire non si è appena sviluppato ma si sta espandendo e ha già consumato parte del bosco.



Figura 22 Ambientazione dell'applicazione vista dall'alto

La decisione di non svolgere la simulazione in un'area in pendenza è stata presa perché, essendo la locomozione reale (*room scaling*), non si voleva creare un effetto di straniamento nell'utente che vedendo, un terreno in pendenza, ma non percependone gli stimoli appropriati, avrebbe potuto non sentirsi partecipe della simulazione o, nel peggiore dei casi, soffrire di “motion sickness<sup>5</sup>”.

Per entrambe le modalità si è utilizzata la stessa ambientazione, tranne per il fatto che nella modalità valutata la zona di intervento è stata ricoperta con la vegetazione necessaria al fuoco per diffondersi.

## 4.6 Progettazione della simulazione dell'incendio

Per quanto riguarda la propagazione del fuoco, l'obiettivo era quello di creare una simulazione quanto più possibile non predeterminata, ma coerente rispetto alle condizioni ambientali e le variabili scelte di intensità del fuoco. In questo modo, ogni simulazione sarebbe stata diversa dalla precedente e l'utente avrebbe dovuto agire in modo corretto a seconda di come l'incendio si fosse evoluto senza poter memorizzare uno schema preciso con cui ultimare in modo ottimale uno scenario fisso. Per questo motivo non è stato possibile utilizzare software di CFD per analizzare a priori l'evoluzione dell'incendio, e si è invece sviluppato, come anticipato, un sistema di propagazione *ad hoc*.

---

<sup>5</sup> In italiano Chinetori è un disturbo derivante dalla discrepanza tra movimento effettivo ed atteso, sia esso reale o percepito.

In particolare, si è deciso di realizzare due tipologie di fuoco:

- un fuoco *statico*, utile per le fasi di apprendimento, che reagisce agli stimoli esterni come un fuoco normale, ma non si propaga e non si estingue da solo;
- un fuoco *dinamico*, che si propaga e brucia il combustibile presente nella scena.

Sono inoltre state sviluppate due tipologie di innesco:

- *fronte di fuoco*, con cui si incendia un intero lato dell'area;
- *spot*, con cui si incendia un singolo punto dell'area.

## 4.7 Menu iniziale

All'avvio dell'applicazione all'utente viene mostrato immediatamente il menu iniziale con le scelte da compiere. Il menù è visionato solo lato desktop. L'utente con indosso il visore si troverà invece in una stanza dove può prendere visione della legenda coi vari simboli relativi ai possibili errori che gli saranno mostrati nel corso della simulazione, e dove un NPC con ruolo di istruttore gli spiegherà le dinamiche della modalità che andrà ad affrontare. Questa scelta è stata presa in quanto l'applicazione è pensata per essere utilizzata sotto la supervisione di un istruttore che può scegliere i parametri della simulazione a suo piacimento per osservare come l'operatore reagisce e metterlo alla prova in diverse situazioni. È da notare, comunque, come questa scelta non pregiudichi la possibilità che un utente avvii e svolga la simulazione in totale autonomia con il solo scopo di allenarsi privatamente: è infatti previsto un sufficiente lasso di tempo perché l'utente possa effettuare le scelte lato desktop, indossare il visore e cominciare la simulazione.

La struttura del menu è mostrata nel flow chart in Fig. 23

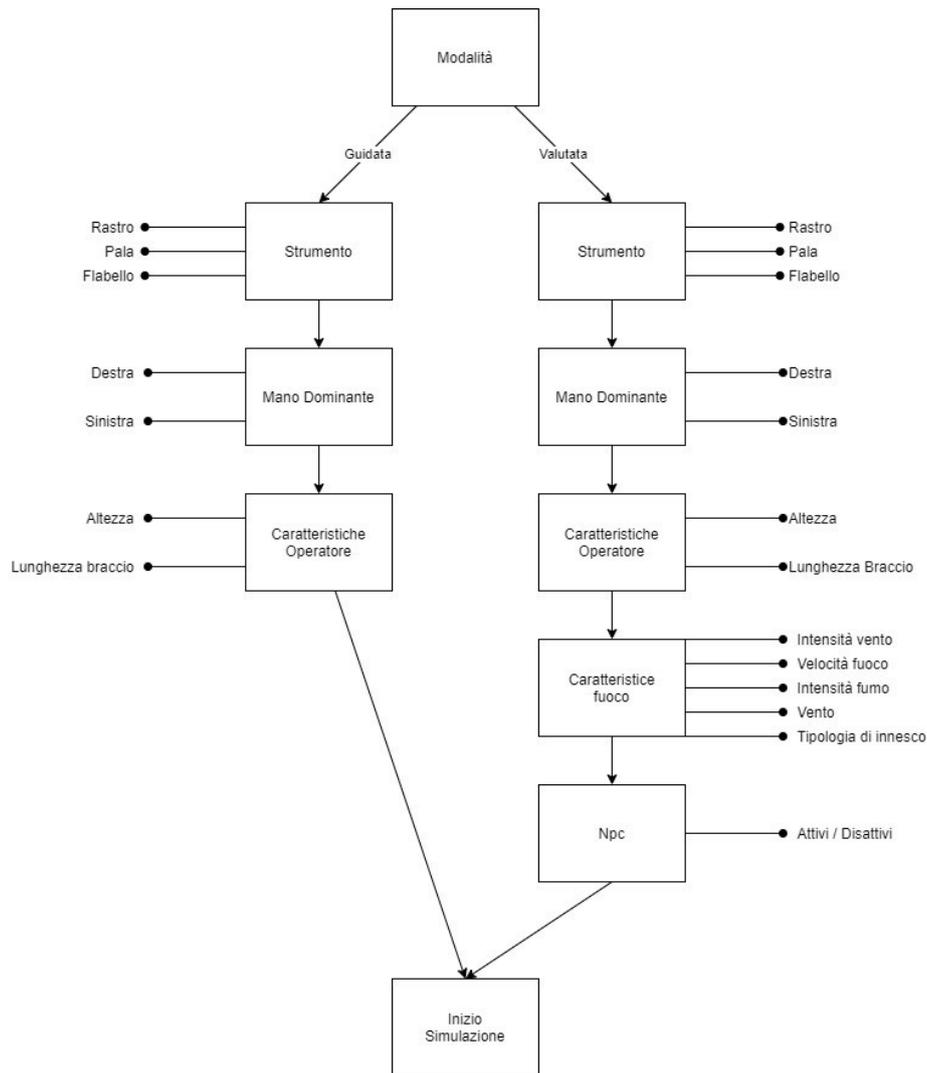


Figura 23 Scelte menu

Nel seguito verranno discussi i singoli sotto-menu.

#### 4.7.1 Strumento

Come già descritto nel capitolo introduttivo è possibile scegliere tra tre diversi strumenti: pala, rastro e fiabello.

La scelta dello strumento andrà a modificare le informazioni fornite nella modalità guidata e il metodo di valutazione nella modalità valutata oltre a definire le azioni che sarà possibile effettuare.

## 4.7.2 Mano dominante e caratteristiche dell'operatore

In questo sottomenu si devono fornire alcune informazioni riguardo alla propria fisionomia in modo che la valutazione possa avvenire in modo corretto. Mentre le caratteristiche dell'operatore (altezza e lunghezza del braccio) possono essere valutate in automatico tramite i sensori indossati, la mano dominante va indicata e non può essere determinata automaticamente.

## 4.7.3 Caratteristiche dell'incendio

In questa fase si possono scegliere le varie caratteristiche che si potranno assegnare all'incendio e al contesto in cui si sviluppa: tipologia di innesco (fronte di fuoco o spot), presenza e intensità del vento, velocità dell'incendio e intensità del fumo.

## 4.7.4 NPC

Si è deciso di aggiungere la possibilità di disattivare gli NPC presenti nella scena, qualora si decida di farlo saranno disattivi solo gli NPC che aiutano direttamente l'operatore e non quelli esterni, che svolgono solamente una funzione di modello sul corretto utilizzo degli strumenti.

La possibilità di disattivare gli NPC è stata garantita per dare più possibilità di scelta e di varietà delle situazioni, inoltre senza gli NPC è possibile concentrarsi maggiormente sull'azione di uso dello strumento eliminando possibili fonti di distrazione.

## 4.8 Progettazione degli NPC

Al fine di poter valutare la capacità dell'utente di agire anche in presenza di altri individui, si è deciso di inserire vari NPC nell'ambiente con ruoli differenti. Sono stati infatti pensati NPC che potessero supportare l'esperienza in modi diversi. In particolare, si sono definite due tipologie di NPC, descritte di seguito.

- NPC attivo: è pensato per agire insieme all'operatore umano e aiutarlo nell'azione di contenimento delle fiamme. Ne sono stati inseriti due all'interno dell'area di intervento, che si mantengono sempre a distanza di sicurezza tra di loro e dall'utente, il quale rimane

comunque in completo controllo della situazione potendo, avvicinandosi ad uno di essi, indurlo a spostarsi ed agire sull'area di suo interesse.

- NPC passivo: pensato più a scopo dimostrativo. Ne sono stati disposti svariati lontani dall'area di intervento, che ripetono una determinata azione (uso dello strumento, trasporto, ecc.) al fine di poter essere un modello per l'utente, che in ogni momento può osservare i corretti movimenti da compiere per svolgere le varie azioni che gli sono richieste. Oltre a servire come dimostrazione dei corretti comportamenti, questi NPC aiutano a contestualizzare meglio lo scenario, facendo sentire l'utente parte di un gruppo di volontari recatosi sul luogo dell'intervento.

L'aspetto degli NPC (Fig. 24 e 25) è stato ricreato basandosi sulle informazioni e sui documenti forniti durante le varie riunioni con i responsabili AIB. Ogni NPC è stato quindi equipaggiato di tutti i Dispositivi di Protezione Individuale (DPI) necessari e correttamente indossati, così da dimostrare il corretto impiego di tali dispositivi, fondamentali per proteggere gli operatori dai vari rischi di lesioni derivanti dalla pericolosità del contesto in cui operano.

L'equipaggiamento fornito è composto da:

- caschetto di protezione con logo;
- occhiali protettivi;
- passamontagna;
- respiratore;
- giacca con relativa cintura portaborse;
- guanti;
- pantaloni;

– scarponi.

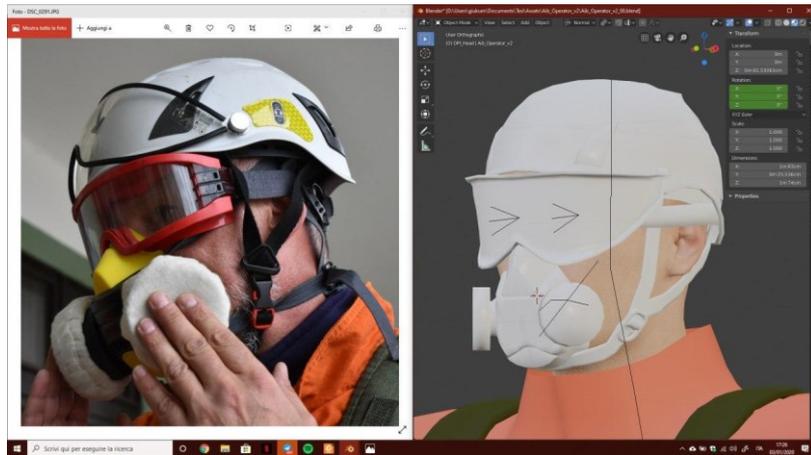


Figura 24 Comparazione casco reale e modello realizzato



Figura 25 Modello NPC

Tutte le parti dell'equipaggiamento realizzate riproducono esattamente i DPI usati dagli operatori del Corpo AIB Piemonte.

## 4.9 La validazione

Le varie scelte implementative e di design sono state sempre discusse approfonditamente con gli esperti del Corpo AIB Piemonte in un continuo e proficuo scambio di informazioni prima di essere da loro validate e quindi inserite nel progetto finale. Questo continuo scambio di informazioni ha facilitato e snellito il processo di progettazione, consentendo la realizzazione di uno strumento specifico che risponde alle necessità di addestramento richieste.

## 5 Realizzazione

Gli argomenti trattati nel seguito di questo capitolo discuteranno i vari elementi che caratterizzano la modalità valutata quindi: la propagazione dell'incendio, l'interazione degli strumenti con l'ambiente e con il fuoco e la logica a supporto degli NPC. In modalità guidata, come detto in precedenza, non sono presenti NPC e non è presente un incendio che si propaga in quanto tale modalità è pensata per insegnare all'utente ad utilizzare correttamente i vari strumenti e non a testarne le abilità in una simulazione realistica.

All'avvio dell'applicazione, dopo aver selezionato le impostazioni desiderate nel menu principale, l'utente si troverà immerso all'interno di un bosco. Avendo selezionato la modalità valutata si innescherà immediatamente un incendio e l'utente sarà chiamato ad agire per estinguerlo con l'aiuto di due NPC che lo supporteranno durante tutto lo svolgimento delle operazioni.

L'utente sarà libero di muoversi in una stanza reale di 10m x 10m, prevista presso il Centro di formazione dell'AIB a Peveragno (anche se in linea di principio potrebbe trattarsi anche di un'installazione mobile), impugnando realmente lo strumento che avrà deciso di usare. I movimenti dell'utente e dello strumento saranno tracciati da appositi sensori e riportati nell'applicazione lasciando quanta più libertà possibile all'utente. Avendo usato come metodo di locomozione quello denominato "room scaling" anche l'area virtuale presa in considerazione nell'applicazione potrà essere al massimo di 10m x 10m; un'area più ampia sarebbe infatti inutile poiché non raggiungibile fisicamente dall'utente. Questa scelta, unita al fatto che l'utente possa impugnare realmente lo stesso strumento usato nella simulazione, aumentano il livello di realismo e di immersione.



*Figura 26 Dottorando prova l'applicazione con tutto il setup completo*

In Fig. 26 si può vedere un utente intento ad utilizzare l'applicazione. Indossa un paio di guanti dell'uniforme dei volontari modificati in modo da poter ospitare i tracker per il tracciamento dei polsi; lo strumento che impugna è un rastrello a cui sono state rimosse le lame all'estremità, anch'esso modificato così da poter montare un tracker per tracciarne i movimenti.

Nel seguito saranno discusse le tecniche utilizzate per realizzare quanto descritto, gli ostacoli principali che si sono affrontati e come questi siano stati superati.

## 5.1 Propagazione dell'incendio

La propagazione del fuoco è la parte centrale di questo lavoro di tesi. L'obiettivo era quello di ottenere un modello il più accurato e rappresentativo possibile di un incendio boschivo che risponda alle caratteristiche precedentemente discusse (altezza massima 1m e velocità compresa tra 1 m/s e 4 m/s) e con un livello di precisione tale che l'effetto risultante fosse il più possibile omogeneo ed organico. Sono quindi stati esplorate diverse possibilità, fino al raggiungimento di un modello il più possibile realistico e al tempo stesso eseguibile in tempo reale all'interno di un'applicazione VR. Per ottenere il modello scelto si è partiti dallo studio di modelli matematici complessi, che descrivono nel dettaglio i vari aspetti della propagazione dell'incendio boschivo, per poi semplificarli mantenendone gli aspetti principali.

La propagazione dell'incendio si divide essenzialmente in due aspetti principali: la generazione del terreno su cui l'incendio si propaga e la diffusione delle fiamme.

### 5.1.1 Generazione del terreno

Parte fondamentale della diffusione dell'incendio è il tipo di combustibile con cui si propaga. Nel caso in esame, per ottenere un incendio radente, il combustibile deve essere composto di elementi si trovano sul suolo in un bosco (lettiera, erba, foglie, ecc.); non devono essere presenti alberi ad alto fusto o cespugli che, se in fiamme, definiscono un incendio di intensità maggiore, tipicamente non affrontabile direttamente con strumenti manuali.

Nell'applicazione sono presenti tre diverse categorie di elementi che compongono la vegetazione al suolo, ognuna delle quali presenta caratteristiche peculiari e rappresentative.

- Terra: sulla terra il fuoco non può propagarsi in quanto non è presente alcun combustibile.
- Erba: un combustibile denso, impiega di più a prendere fuoco, ma brucia molto intensamente.
- Foglie: un combustibile rado, prende fuoco in poco tempo e brucia con intensità media.

Con queste tre categorie si è ritenuto di poter rappresentare al meglio il contesto del sottobosco: l'applicazione è stata in ogni caso realizzata in modo che questo insieme di elementi si possa facilmente espandere in caso di necessità.

La gestione dei suddetti elementi è stata poi realizzata all'atto pratico suddividendo il terreno in quelle che sono state chiamate *tile*<sup>6</sup> e gestendo ognuna di esse singolarmente. Ogni *tile* rappresenta l'elemento più piccolo che compone il terreno dell'area di gioco. Inizialmente queste potevano rappresentare una sola categoria di quelle presentate in quanto si era deciso di posizionare in ognuna di esse una sola tipologia di vegetazione; questo vincolo è stato poi abbandonato in favore di una soluzione più versatile in cui ogni *tile* possono essere presenti diversi tipi di vegetazione (foglie, erba o terra) in proporzioni diverse.

Secondo il modello di Richard C. Rothermel del 1972, sono quattro i parametri più importanti da tenere in considerazione nella realizzazione di un modello di diffusione del fuoco: umidità, componente minerale, dimensione e densità del combustibile.

Per ogni *tile* sono stati quindi definiti vari parametri che descrivessero il tipo di combustibile e rappresentassero i parametri indicati da Rothermel stesso.

- Vita: a sua volta si divide in due parametri differenti che, nel codice, prendono il nome di “maxHealth” e “health”. La prima è una costante reale positiva, che rappresenta quello che nella realtà è la temperatura di innesco, cioè il limite oltre il quale quella porzione di combustibile prende fuoco. La seconda è una variabile reale positiva, che rappresenta quello che nella realtà è l'attuale temperatura del combustibile. Questi due valori assieme consentono di replicare il processo di riscaldamento che porta il combustibile alla temperatura di innesco e quindi ad avviare il fuoco. Mentre il riscaldamento è incrementale (da temperatura attuale

---

<sup>6</sup> Con il termine *tile* si intende una porzione di terreno, di dimensione nota e con caratteristiche specifiche.

più bassa a temperatura di innesco più alta), nel modello realizzato se la *tile* si trova vicino ad una fiamma perde vita fino a quando, raggiunto il valore minimo 0, prende fuoco. Il parametro dipende dal tipo di combustibile presente nella *tile* e da quanto l'area di superficie della *tile* stessa è coperta da esso; è quindi rappresentativo degli aspetti di *Componente minerale*, *Dimensione del combustibile* e *Densità del combustibile*.

- **Umidità:** indica quanto quella porzione di terreno è umida. È un numero reale che rappresenta il coefficiente di smorzamento dovuto al fatto che il combustibile è bagnato. Può assumere valori compresi tra 0 e 0.4 che in letteratura (Rothermel, 1972) è il valore indicato come valore oltre il quale è impossibile che il fuoco si diffonda su un combustibile di tipo lettiera. Più la *tile* è umida, maggiore sarà il tempo impiegato affinché prenda fuoco.
- **Carburante:** come per il primo parametro, anche questo è rappresentato da due variabili distinte “maxFuel” e “fuel”. La prima è costante reale positiva, che indica quanto combustibile è presente nella *tile*. La seconda è invece variabile reale positiva, che indica quanto carburante è rimasto al fuoco da bruciare. Queste due variabili insieme permettono di simulare, una volta che la *tile* ha preso fuoco, il processo tramite cui il fuoco consuma il combustibile presente fino ad esaurirlo ed estinguersi.

Altre variabili sono poi state usate per indicare lo stato della *tile* (a fuoco, infiammabile, bruciata, ecc.), che può assumere gli stati: “OnFire” ad indicare che è presente un fuoco sulla *tile*, “Burned” ad indicare che il carburante nella *tile* è stato completamente consumato, e “Flammable” ad indicare che la *tile* è in condizione di prendere fuoco.

Per rappresentare i vari tipi di terreno in Unity, si sono realizzati due set di `GameObject`<sup>7</sup>, uno per rappresentare le foglie e uno per rappresentare l'erba; per la terra non è stato necessario perché è stato sufficiente non disporre sul terreno alcun oggetto.

Inizialmente si è pensato di racchiudere nei `GameObject` sia l'aspetto estetico della *tile* che quello parametrico, assegnando ad ogni oggetto non solo l'apposita mesh e materiale, ma anche uno script contenente i vari parametri sopra elencati. Ogni `GameObject` era posizionato in una *tile* in modo da ricoprirlo interamente. Questa strada è stata poi abbandonata e si è deciso di separare in modo netto

---

<sup>7</sup> `GameObject` è l'elemento fondamentale che in Unity rappresenta ogni elemento della scena, personaggi, oggetti di scena, scenario. Un `GameObject` da solo non realizza nessuno scopo particolare, ma essi fungono da contenitori per i Componenti, che implementano diverse funzionalità; per esempio un `GameObject` che rappresenta una luce conterrà un Componente adeguato che gli permetterà di emettere luce.

l'aspetto grafico da quello parametrico poiché ci si è resi conto che questo avrebbe posto vincoli troppo rigidi, per esempio impedendo che due *tile* si sovrapponevano. Se questo fosse successo, sarebbe stato difficile capire quale delle due stesse effettivamente rappresentando il terreno. Si è infine giunti ad un modello in cui i GameObject rappresentano solo l'elemento estetico, così da poterli sovrapporre e, in generale, disporre in modo più libero per creare un effetto più omogeneo. L'aspetto parametrico è invece stato affidato ad una matrice di *tile* in cui ogni cella rappresenta una porzione di terreno. I valori non sono assegnati a priori, come avveniva quando il GameObject racchiudeva in sé tutte le caratteristiche della *tile*, ma tramite scansione dinamica del terreno. Questa scansione è effettuata usando cinque *raycast*<sup>8</sup> per ogni *tile* (quattro agli angoli e uno al centro). Ogni *raycast* viene generato al di sopra e centrato rispetto alla *tile*, direzionato in modo ortogonale a questa in modo da colpire la *tile* dall'alto verso il basso. In questo modo indaga quali elementi siano presenti all'interno della *tile* nel punto in cui colpisce il terreno e, in base agli elementi che sono stati identificati dai *raycast*, viene assegnato un valore appropriato ai parametri della *tile*.

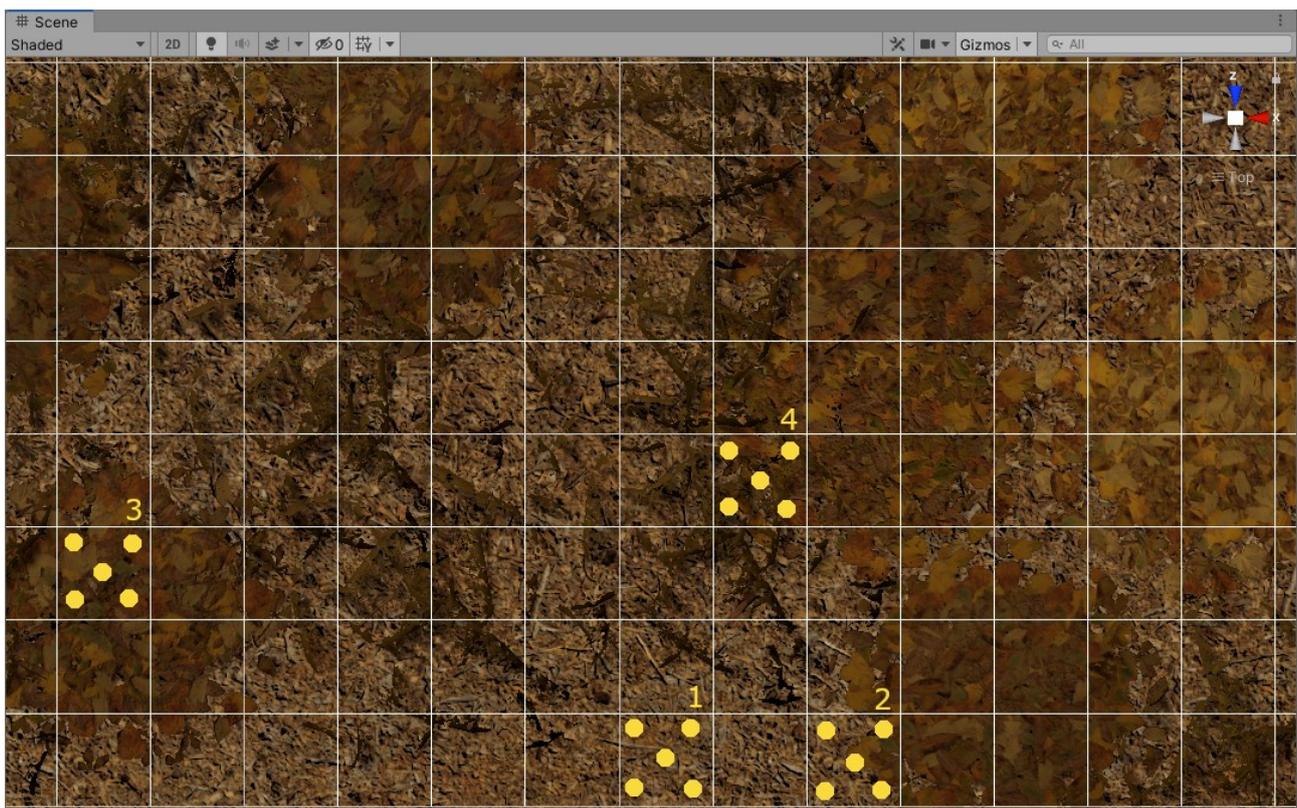


Figura 27 Esempio scansione terreno

Nella Fig. 27 è mostrato come avviene la scansione. I pallini indicano dove il *raycast* ha colpito il terreno. Per ognuna delle quattro *tile* evidenziate si avranno valori differenti. Ipotizzando di assegnare

<sup>8</sup> Con il termine *raycast* si intende una tecnica che, tramite l'ausilio di un raggio generato in un punto con una certa direzione, mira ad indagare quali oggetti sono presenti nello spazio percorso dal raggio

5 al valore di “maxHealth” per ogni *raycast* che ha colpito delle foglie, 10 per ogni *raycast* che ha colpito dell’erba e 0 per ogni *raycast* che ha colpito la terra, per le *tile* in questione si avrebbe che:

1. “maxHealth” = 0 → non infiammabile;
2. “maxHealth” = 15 → infiammabile;
3. “maxHealth” = 25 → infiammabile;
4. “maxHealth” = 40 → infiammabile;

Lo stesso ragionamento viene fatto per assegnare i valori di carburante e per definire se una *tile* sia infiammabile o meno. Il parametro di umidità, invece, viene assegnato in base al valore delle *tile* adiacenti, andando a sommare ad esso un valore casuale compreso tra -0.1 e 0.1; ciò permette di avere una certa variabilità, ma non una completa casualità. Sarebbe stato poco realistico se da una *tile* a quella immediatamente successiva il valore di umidità fosse passato dal valore minimo a quello massimo in modo repentino.

Il risultato finale è mostrato nelle Fig. 28 e 29. Si possono vedere degli esempi di terreno cosparso di foglie ed erba in modo omogeneo, ma non completamente coperto, così da lasciare spazi di terra dove il fuoco non ha modo di diffondersi. La griglia in sovraimpressione invece, è una rappresentazione grafica della matrice di *tile* non visibile durante l’esecuzione dell’applicazione. Sono stati riportati due esempi (Fig. 28 lato *tile* 1m, Fig. 29 lato *tile* 0.25m) per mettere in evidenza che è possibile scegliere la dimensione delle *tile* che compongono la matrice. Ciò è stato preso in considerazione anche nell’assegnazione dei parametri delle *tile*, in quanto, più una *tile* è grande, maggiore sarà la superficie che occupa e, di conseguenza, dovranno variare i parametri associati.

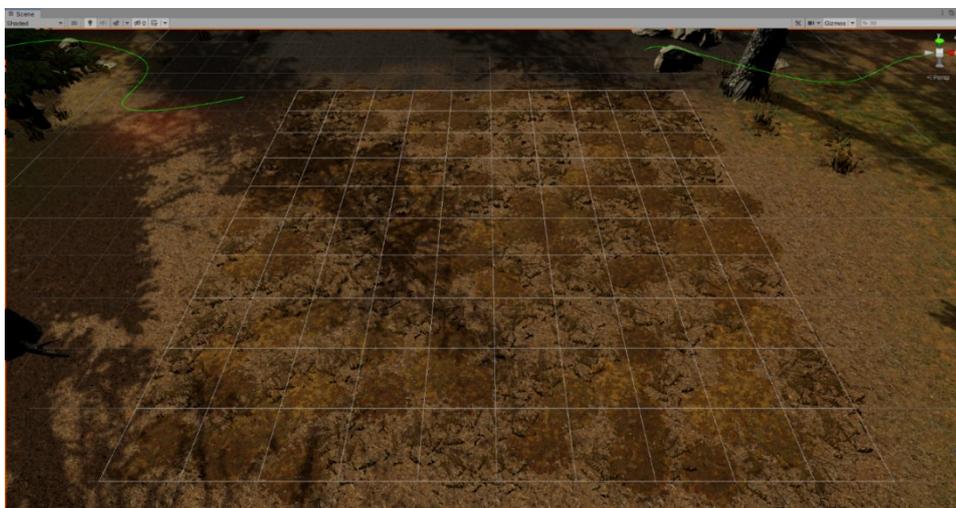


Figura 28 Terreno finale, lato *tile* 1m



Figura 29 Terreno finale, lato tile 0,25m

La gestione del terreno è affidata principalmente a due script chiamati *TerrainGrid* e *Tile*.

*TerrainGrid* è uno script che contiene tutte le informazioni riguardanti la matrice di *tile* e fornisce le funzionalità principali per lavorare su di essa. Esso esegue le funzioni necessarie a generare la matrice e popolare i valori tramite la scansione precedentemente descritta. Oltre alle funzioni per gestire la matrice, *TerrainGrid* fornisce anche alcune funzioni di gestione di alto livello delle singole *tile* come il reperimento delle coordinate di una *tile* specifica o la conversione da coordinate della matrice a posizione 3D nel mondo di Unity.

*Tile* è invece lo script di gestione delle *tile* a basso livello; esso contiene tutte le informazioni parametriche descritte in precedenza, e fornisce le funzioni necessarie per accedere a tali valori e modificarli.

### 5.1.2 Diffusione delle fiamme

Il sistema che regola il modo in cui le fiamme si propagano è interamente costruito sul sistema di *tile* presentato precedentemente. Il fuoco, infatti, si diffonde spostandosi da una *tile* a quelle adiacenti.

Il fuoco presenta due diversi comportamenti osservabili a differenti livelli di dettaglio, uno più generale come incendio e uno più specifico come singolo fuoco. Ogni fuoco ha un comportamento proprio e indipendente dagli altri, e segue il proprio ciclo di vita da quando comincia a bruciare fino

a quando si estingue. L'insieme dei singoli fuochi compone l'incendio di cui è possibile osservare un comportamento complessivo definito dal modo in cui si espande.

In Unity ogni fuoco è stato gestito tramite un `GameObject` che, oltre a contenerne gli aspetti grafici, contiene anche i componenti necessari a gestirne la logica, In particolare è composto da:

- un effetto grafico particellare che riproduce le fiamme;
- un *collider*, elemento di Unity che, assegnato ad un oggetto, permette di rilevare le collisioni;
- uno script denominato *fire*, che ne gestisce il ciclo di vita.

Il ciclo di vita di un fuoco si sviluppa in tre fasi: nascita sviluppo ed estinzione. La nascita è l'evento in cui il fuoco compare su una *tile*; durante lo sviluppo, il fuoco consuma il carburante presente nella stessa *tile* e, quando si verifica l'estinzione, il fuoco sparisce dalla *tile*. L'estinzione può avvenire naturalmente quando tutto il carburante nella *tile* è stato consumato, oppure per mezzo dell'azione di uno strumento.

Come detto, il ciclo di vita del fuoco è gestito dallo script *fire*, che contiene le variabili e le funzioni necessarie a gestirne tutti i vari aspetti. Quando un `GameObject` rappresentante un fuoco viene generato, viene dapprima chiamata una funzione di inizializzazione con il compito di impostare i valori iniziali delle variabili e viene avviata una *coroutine*<sup>9</sup> incaricata di gestire lo sviluppo della fiamma ed il consumo del carburante della *tile*. La *coroutine* svolge un compito molto semplice quanto importante: ad intervalli regolari di 0.2s controlla che il carburante presente nella *tile* non sia finito e, se questa condizione è verificata, ne consuma una certa quantità che dipende da quanto carburante è ancora presente. Una gran quantità di carburante farà bruciare prima e più intensamente la fiamma, una bassa quantità di carburante, invece, farà sì che la fiamma bruci con meno intensità. Ripetendo questa azione più volte nel tempo questo script consuma tutto il carburante presente, fino a quando si esaurisce; quando ciò accade, lo stato della *tile* passa da "OnFire" a "Burned" ad indicare che è completamente bruciata e il `GameObject` è distrutto. L'estinzione della fiamma tramite lo strumento sarà discussa in seguito quando si tratterà la realizzazione della pala.

Altro compito affidato allo script *fire* è la gestione dei lapilli. Nel caso in cui venga applicata troppa energia nel colpire con lo strumento una zona di terreno in fiamme, alcuni frammenti di combustibile incandescente potrebbero spargersi incendiando l'area circostante. Quando si ha il contatto tra

---

<sup>9</sup> Coroutine – è una funzione in grado di mettere in pausa la sua esecuzione e riprenderla al frame successivo, a differenza di una normale funzione che è invece costretta a svolgere tutto il suo compito nel tempo di un solo frame

fiamma e strumento, lo script controlla la velocità a cui la collisione è avvenuta e, se questa dovesse risultare troppo elevata, provvede a generare dei lapilli; questi sono realizzati mediante `GameObject` specifici ai quali viene applicata una forza che li spinge lontani dalla fiamma e, cadendo su una *tile*, la incendiano.

Il comportamento globale dell'incendio è invece gestito dallo script chiamato *FireManager*, incaricato di gestire tutte le fiamme presenti in scena e di realizzare la propagazione del fuoco. Per farlo si appoggia principalmente a due strutture dati: una mappa che serve a memorizzare le fiamme attualmente accese e una mappa che memorizza le *tile* da bruciare adiacenti ad esse.

Il processo di propagazione del fuoco comincia quando una *tile* prende fuoco; questo avviene non appena la scena viene caricata e può verificarsi in due modi diversi, motivo per cui, come detto, sono stati pensati e realizzati due differenti tipi di innesco: “fronte di fuoco” (un'intera fila di *tile* si incendia contemporaneamente), e “spot” (una singola *tile* si incendia).

Il primo genererà un fronte compatto (Fig. 30) che procede per tutta la lunghezza del terreno giocabile; il secondo invece genererà un anello (Fig. 31) con fiamme che si sviluppano partendo dal centro e si diffondono a cerchio fino a bruciare tutto ciò che è presente nell'area di gioco.



Figura 30 diffusione incendio con innesco a fronte di fuoco



Figura 31 diffusione incendio con innesco a spot

Nel momento in cui una *tile* si incendia viene chiamata la funzione “`SpawnFire`” presente in questo script, che, per prima cosa, a partire dalle sue coordinate X e Z genera una chiave che userà per poterla identificare successivamente e per poter popolare le due mappe. Nella mappa contenente i fuochi accesi, lo script si limita ad inserire, alla chiave corrispondente, un identificativo dell'oggetto rappresentante il fuoco associato alla *tile*. Questa informazione sarà utile per conoscere lo stato del

fuoco nel tempo. Per quanto riguarda la mappa delle *tile* adiacenti, invece, sono selezionate, tra le otto circostanti a quella in fiamme, le celle in cui non è già presente un fuoco e che sono identificate come infiammabili. Popolate le strutture dati, se non è già stata avviata precedentemente, la funzione “SpawnFire” avvia una *coroutine* chiamata “propagate” che effettua tutti i calcoli necessari a propagare le fiamme.

La *coroutine* “propagate” esegue un loop che termina solamente quando non sono più presenti fuochi ed in cui ad ogni ripetizione viene eseguito il codice rappresentato dal flow chart riportato in Fig. 32. Ad ogni frame questa *coroutine* controlla tutti gli elementi della scena e mette in atto i comportamenti necessari affinché il fuoco si propaghi.

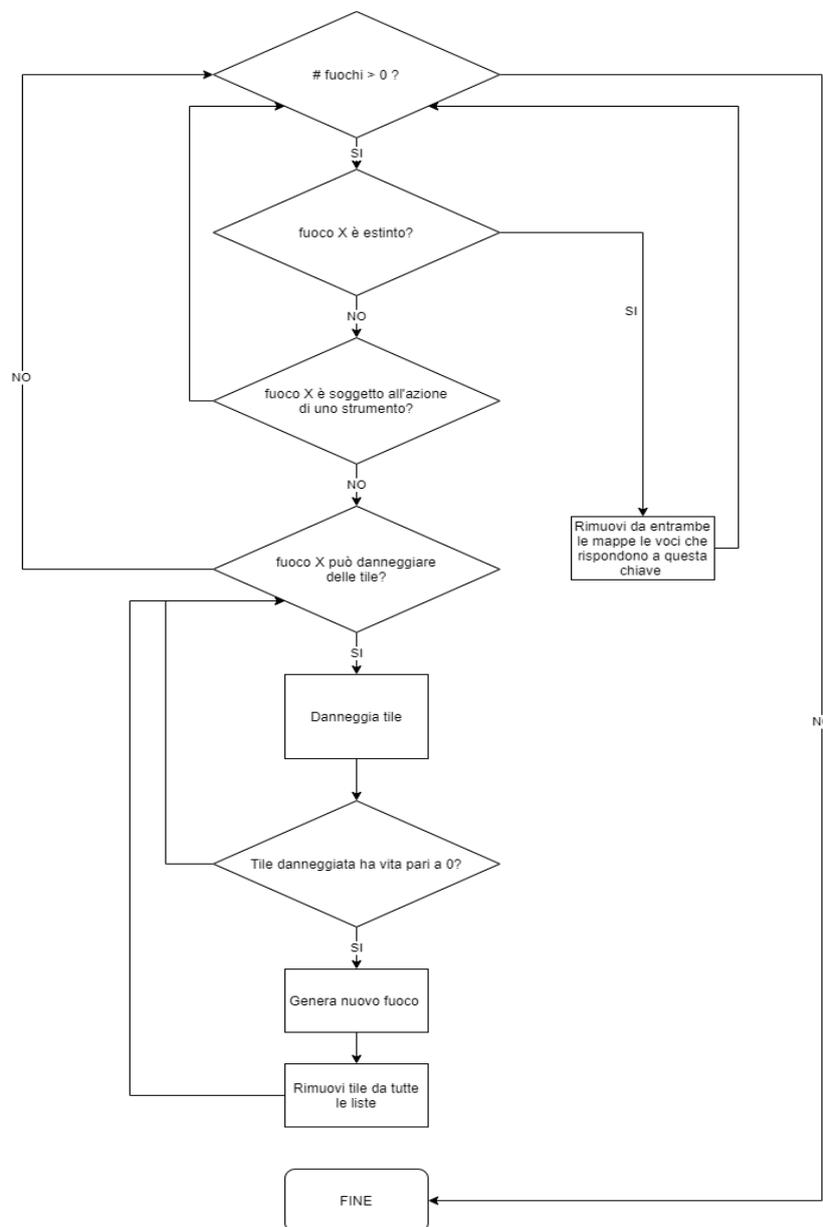


Figura 32 Flow chart della funzione “propagate” eseguita dallo script Fire Manager

Fondamentale in questo processo è il calcolo del danno, cuore del processo di propagazione e punto in cui si concretizza lo studio dei vari modelli di propagazione. Le formule che restituiscono il valore del danno da applicare ad una *tile* sono state costruite a partire dal modello teorizzato da Rothermel nel 1972, semplificandolo e adattandolo.

$$DannoTile = \frac{VelocitàFuoco}{VelocitàMaxFuoco} * \frac{CarburanteInizialeTile}{CarburanteMaxTile} * DannoBase * (1 - umidità)$$

$$Danno = (DannoTile) * (1 + (Intensità Vento * Direzione Vento))$$

Parametro	Significato
DannoTile	Rappresenta l' <i>Intensità di Reazione</i> , una misura di quanta energia viene rilasciata per unità di area di terreno in combustione. Valore base del danno applicato da un fuoco posizionato su una specifica <i>tile</i> , dipende dalle proprietà tipiche della <i>tile</i> .
VelocitàFuoco / VelocitàMaxFuoco	Rappresenta la potenziale velocità di diffusione, cioè quella che si avrebbe se il combustibile fosse completamente secco e privo di elementi minerali.
CarburanteInizialeTile / CarburanteMaxTile	Rappresenta il <i>Carico Netto di Reazione</i> coefficiente che dipende dal carburante presente nella <i>tile</i>
DannoBase	Costante che indica il calore emesso dal combustibile
(1 - Umidità)	Rappresenta il coefficiente di smorzamento dovuto dall'umidità.
Danno	Rappresenta la <i>Sorgente di Calore o Flusso di Propagazione</i> , una misura del calore trasmesso da un fuoco al combustibile nelle sue prossimità.
(1+Intensità Vento * Direzione Vento)	Rappresenta l'addizionale calore convettivo dovuto dalla presenza del vento.

Come evidenziato dalla formula esiste una componente di aumento del calore dovuta alla presenza del vento. Nella simulazione è possibile decidere di attivare o meno la presenza del vento, solo se si sceglie come modalità di innesco la modalità a "spot", dove la presenza del vento permette di modificare la direzione, la forma complessiva e la velocità di diffusione dell'incendio. Nella modalità "fronte di fuoco", invece, la presenza del vento non sarebbe apprezzabile e non apporterebbe alcun

vantaggio alla simulazione, limitandosi solamente a velocizzare o rallentare il fronte senza cambiarne il comportamento generale. Nonostante le dimensioni ridotte dell'area della simulazione (solitamente un incendio si diffonde su aree molto più vaste di quella presa in considerazione nell'applicazione), l'effetto del vento risulta apprezzabile e si è ritenuto potesse essere un elemento di complessità aggiuntivo utile al fine dell'addestramento.

L'effetto del vento è stato realizzato andando a sovrapporre una matrice 3x3 sulla cella (Fig. 33) in cui è presente il fuoco e andando a moltiplicare il danno applicato da quella cella a quelle adiacenti per dei coefficienti appropriati; in particolare, il danno è incrementato di un fattore pari al 50% dell'intensità del vento nella direzione a favore, di un fattore pari al 20% dell'intensità del vento nelle celle immediatamente adiacenti a quella parallela alla direzione del vento, di un fattore pari al 10% dell'intensità del vento in direzione perpendicolare a quella del vento ed annullato in direzione contraria. L'intensità del vento può essere selezionata prima di cominciare la simulazione e può variare tra 0km/h e 10km/h.

0.2	0.5	0.2
0.1	0	0.1
0	0	0



Figura 33 Visualizzazione della matrice del vento

Parametrizzare correttamente i vari elementi che compongono la formula è stato molto importante per garantire la corretta velocità di propagazione dell'incendio: un danno troppo elevato avrebbe infatti portato l'incendio a bruciare troppo velocemente, mentre uno troppo ridotto avrebbe reso eccessivamente semplice l'addestramento. Dopo vari tentativi e confronti con gli esperti si è riusciti ad ottenere una parametrizzazione che soddisfacesse i criteri richiesti.

Tramite il supporto del sistema di *tile* progettato è stato possibile gestire la generazione del terreno e la propagazione delle fiamme, riducendo la complessità della simulazione e fornendo le basi per costruire un'applicazione flessibile e versatile.

## 5.2 Realizzazione degli strumenti

Gli strumenti rappresentano il mezzo tramite cui l'utente può interagire con il fuoco e con l'ambiente circostante. Sono stati realizzati tre strumenti: pala, rastro e flabello, ognuno dei quali ha delle caratteristiche peculiari e diverse interazioni con l'ambiente o con il fuoco.

### 5.2.1 Realizzazione del rastro

Il rastro ha rappresentato la sfida maggiore per quanto riguarda lo sviluppo degli strumenti. L'obiettivo era quello di poter rimuovere lo strato di combustibile presente al suolo lasciando solo il terreno sottostante; questo avrebbe dovuto avere un riscontro sia visivo, sia parametrico sui valori delle *tile* sulle quali il rastro fosse stato utilizzato. Inoltre, è stato necessario che i due effetti fossero correlati in modo che l'utente avesse un riscontro visivo chiaro di quello che effettivamente stesse accadendo a livello parametrico.

Il rastro si utilizza appoggiando sulle terreno la parte frontale composta dalle lame e trascinandolo verso sé stessi tenendo le lame sempre a contatto con il suolo. In questo movimento lo strumento raccoglie e sposta foglie, rametti, erba secca e altri elementi presenti a terra; ripetendo questo movimento più volte è possibile liberare completamente il suolo da tutto ciò che lo ricopre lasciando solamente terra nel punto in cui si è operato. Questa operazione, svolta davanti ad un fronte di fuoco, permette di rimuovere il combustibile che l'incendio andrebbe a consumare per propagarsi, arrestandone quindi la diffusione.

L'utilizzo di questo strumento si può quindi analizzare e scomporre in alcuni punti chiave:

- 1 lo strumento va poggiato a terra, e ciò definisce il punto di inizio del movimento;
- 2 lo strumento va spostato, idealmente verso sé stessi, ma l'utilizzatore potrebbe muoverlo in qualsiasi direzione; la fine del movimento identifica, insieme al punto di inizio, la direzione e l'ampiezza del movimento;

- 3 lo strumento, nel suo movimento, deve rimuovere eventuale combustibile presente al suolo e depositarlo nel punto in cui il movimento finisce.

Parte fondamentale per riuscire a replicare questo comportamento è la possibilità di identificare e tracciare nel tempo la posizione e larghezza della punta dello strumento in modo da poter identificare esattamente la porzione di suolo coperta nel movimento. Questo è stato possibile posizionando due GameObject alle due estremità della punta (Fig. 34): avendo ogni GameObject una posizione tracciata in automatico da Unity, è stato semplice reperire la loro posizione e, avendoli posizionati alle estremità, anche la dimensione della lama. Sfruttando queste informazioni è stato possibile identificare le porzioni di terreno interessate dall'utilizzo dello strumento che, nel sistema progettato, significa identificare le *tile* soggette al passaggio del rastrello.



Figura 34 Visualizzazione delle posizione chiave usate per tracciare il movimento del rastrello

In un primo momento si è cercato di riprodurre gli effetti del movimento andandone a identificare la posizione iniziale e finale e valutando poi il vettore che collegava questi due punti per individuare le *tile* coinvolte. Ci si è resi conto però che questo sistema, oltre ad essere oneroso dal punto di vista computazionale, non era sufficientemente accurato: le *tile* raggiunte dal movimento dello strumento erano solamente ipotizzate e non identificate con precisione, e ciò portava ad avere risultati alle volte non corretti in cui alcune *tile* potevano essere considerate quando non lo sarebbero dovute essere e viceversa. Inoltre, fino alla fine del movimento non era possibile applicare gli effetti del passaggio dello strumento, in quanto non era possibile valutare il vettore dello spostamento. Si è quindi cercato di scomporre il comportamento dello strumento a più basso livello, tentando di integrarlo maggiormente con il sistema di *tile* già presente. Nel farlo si è osservato che il movimento delle lame

poteva avvenire all'interno della stessa *tile* o da una *tile* a quella successiva nella direzione del movimento. Partendo da questa osservazione si è deciso di campionare ad intervalli di tempo regolari il movimento del rastro per poter identificare i due casi e gestirli opportunamente. Il campionamento comincia quando il rastro entra in contatto con il terreno e nel momento in cui si rileva un movimento (posizione attuale diversa dalla precedente) si indaga quale dei due casi osservati sia avvenuto e si agisce di conseguenza. Considerando il movimento all'interno della stessa *tile*, se la *tile* ha del carburante ne viene rimossa una parte e la stessa quantità viene aggiunta come carico del rastro; un successivo movimento all'interno della stessa *tile* non comporta altre operazioni di alcun tipo; non viene rimosso altro carburante e non viene depositato il carico presente sul rastro. Considerando invece il movimento su due *tile* diverse, se il rastro è provvisto di carico, questo è rimosso dallo strumento e lasciato nella nuova *tile*; solo in caso di un ulteriore movimento all'interno della stessa *tile* questo è nuovamente raccolto.

Questi due casi tengono conto del movimento finché lo strumento è a contatto con il suolo, ma occorre gestire anche il caso di fine movimento in cui il rastro viene sollevato interrompendo il contatto tra strumento e suolo. Questo caso è gestito semplicemente controllando se, nel momento in cui il contatto viene annullato, è presente del carico: in caso affermativo, il carico viene depositato nell'ultima *tile* interessata dall'azione del rastro e rimosso dallo strumento.

Il comportamento descritto è eseguito per entrambe le estremità della punta dello strumento ed applicando queste semplici regole il movimento del rastro viene tracciato in modo preciso ed efficiente ed il suo effetto è immediatamente visibile. Nonostante, infatti, questo sistema richieda un campionamento continuo della posizione dello strumento, le operazioni da svolgere vengono distribuite nel tempo e non concentrate tutte in un unico istante, alleggerendo così il carico computazionale.

Definite le regole che gestiscono il comportamento dello strumento in condizioni normali si è passati all'interazione dello strumento con il fuoco. In questo caso si possono identificare due casi significativi.

- Il movimento comincia dall'interno delle fiamme e si sposta in una zona non a fuoco: il carico in fiamme viene spostato e l'incendio si diffonde.
- Il movimento comincia in una *tile* non in fiamme e si sposta all'interno di una a fuoco: le fiamme hanno quindi nuovo carburante da bruciare e riprendono vigore.

Il primo caso è gestito in automatico dal sistema di propagazione del fuoco; caricando la *tile* di nuovo carburante, infatti, il fuoco avrà modo di continuare a bruciare riprendendo vigore. Per gestire il secondo caso è stato sufficiente aggiungere al comportamento base del rastro, descritto precedentemente, un flag che indica se il carico trasportato risulta essere in fiamme o meno. Il flag è impostato nel momento in cui il rastro entra in contatto con una fiamma e viene resettato quando il rastro esce dalla *tile* in fiamme e si sposta in una spenta. Il carico in fiamme comporta l'immediata accensione della *tile* in cui questo viene depositato espandendo l'incendio.

Oltre all'aspetto parametrico, un ruolo molto importante è svolto dall'effetto visivo che il passaggio del rastro comporta, in quanto unico feedback che permette all'utente di capire se la sua azione abbia avuto un effetto sull'ambiente. Per ottenere l'effetto più preciso e realistico possibile si è deciso di lavorare direttamente sulla mesh dei GameObject rappresentanti foglie e altri elementi del suolo; una volta che questi sono stati disposti sul terreno, viene memorizzata la posizione tridimensionale di ogni vertice che compone la mesh. Al passaggio del rastro, tra un campionamento e l'altro, le informazioni della posizione degli estremi della punta dello strumento sono usate per definire l'area in cui il rastro è stato utilizzato. Tutti i GameObject che sono entrati in contatto con lo strumento effettuano un controllo per identificare quali dei loro vertici sono compresi nell'area calcolata, e modificano l'altezza di tali vertici in accordo con la quantità di combustibile rimanente nella *tile*. Abbassandosi i vertici spariscono sotto il terreno e danno l'impressione che sia stata rimossa una parte del materiale dal GameObject.

In Fig. 35 si può apprezzare l'effetto dell'abbassamento dei vertici dovuto al passaggio del rastro.



Figura 35 Effetto del rastro: a sinistra un mucchio di foglia prima del passaggio del rastro, a destra lo stesso mucchio di foglie dopo il passaggio del rastro

L'altezza dei vertici della mesh dipendono dal carburante secondo la formula

$$AltezzaVertice = AltezzaIniziale * \left( \frac{CarburanteAttuale}{CarburanteMassimo} \right)$$

Parametro	Descrizione
AltezzaVertice	Valore del parametro y del vettore indicante la posizione globale del punto dopo il passaggio dello strumento.
AltezzaIniziale	Valore del parametro y del vettore indicante la posizione globale all'inizio della simulazione.
CarburanteAttuale	Valore di carburante attualmente presente nella <i>tile</i> .
CarburanteMassimo	Massimo valore di carburante che un <i>tile</i> può assumere, è quel valore che la <i>tile</i> avrebbe se tutti i <i>raycast</i> identificassero del materiale infiammabile nella <i>tile</i> .

Questo processo è stato poi adattato in modo da poter essere utilizzato anche per riprodurre l'effetto del consumo del combustibile dovuto alle fiamme; in questo caso, l'area di controllo è definita dall'area della *tile* che ha preso fuoco.

L'altezza dei vertici, quindi, aiuta a rappresentare il fenomeno di rimozione e di consumo del materiale nella *tile* in cui si agisce o in cui è presente un fuoco.

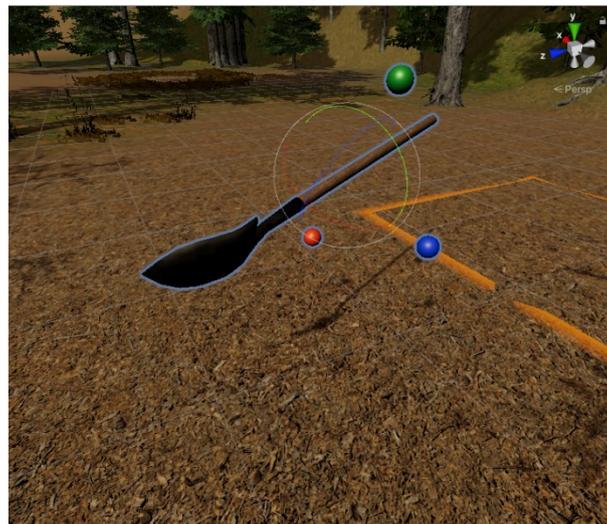
## 5.2.2 Realizzazione della pala

Come per il rastro, il processo di realizzazione è cominciato dall'analisi del suo utilizzo in modo da poterne definire gli aspetti chiave. Nello studio dell'utilizzo della pala si sono evidenziati due usi principali: si può soffocare la fiamma utilizzando la parte piatta della punta, oppure si può usare la lama come il rastro per rimuovere il combustibile. Da questa analisi risulta evidente che il fattore discriminante che differenzia un caso dall'altro, risulta essere l'orientamento dello strumento.

Il primo passo è stato quindi realizzare un sistema per riconoscere come lo strumento fosse orientato. Per tracciare l'orientamento dello strumento si sono utilizzati tre GameObject per identificare altrettante posizioni chiave. Come mostrato in Fig. 36, considerando come "sopra" la parte concava della lama, due sono stati posizionati ai lati ed uno "sotto" la pala.



*Figura 36 Pala parallela al terreno con visualizzazione punti di riferimento*



*Figura 37 Pala ruotata con visualizzazione punti di riferimento*

Valutando la differenza di altezza dal suolo tra questi punti di controllo è stato possibile identificare l'orientamento dello strumento. Infatti, se lo strumento è ruotato di un angolo compreso tra  $0^\circ$  e  $180^\circ$  (Fig. 37), la differenza di altezza tra i due riferimenti sui lati è molto più ampia rispetto a quando è tenuto con la parte piatta della punta parallela al suolo. Per identificare il caso in cui la pala fosse posizionata sottosopra, è stato inserito il terzo punto di riferimento, in quanto coi soli due laterali non sarebbe possibile distinguere il caso in cui la pala non è ruotata da quello in cui è ruotata di  $180^\circ$ . Per identificare questo caso si confronta quindi l'altezza del punto di riferimento posto "sotto" lo

strumento rispetto al terreno, che quindi svolge il ruolo di quarto punto di riferimento fisso. È bene sottolineare però che quest'ultimo caso sia applicabile in quanto il controllo è effettuato quando lo strumento si trova appoggiato al suolo; per generalizzarlo occorrerebbe infatti aggiungere un ulteriore punto di riferimento mobile “sopra” lo strumento e confrontare la differenza di altezza tra i due.

Definito un sistema per poter discriminare il modo in cui lo strumento è utilizzato si è passati ad implementare le diverse funzionalità che l'utensile consente. Per la funzione di rimozione del combustibile è stato sufficiente adattare il funzionamento del rastro; per la funzione di soffocamento delle fiamme, invece, si è proceduto ad implementare un sistema *ad hoc*.

La pressione della punta sulla zona in fiamme toglie ossigeno alla combustione portandola ad estinguersi; rimuovere la pressione prima che la reazione sia conclusa implica che questa si rinvigorisca e torni a diffondersi. Per simulare questo funzionamento si è aggiunto un parametro “Ossigeno” al modello della fiamma, impostato ad un valore iniziale positivo e maggiore di zero. Se viene rilevata una collisione tra la pala, orientata opportunamente, e la fiamma, il valore di questo parametro inizierà a ridursi nel tempo. Se il contatto tra fiamma e pala viene rimosso prima che il parametro si azzeri, questo comincerà ad incrementarsi nel tempo fino a raggiungere il valore di partenza; se il parametro invece si riduce fino a raggiungere lo zero la fiamma si estingue. L'estinzione della fiamma per azione di uno strumento implica che nella *tile* rimanga combustibile non bruciato; la *tile* non sarà quindi identificata come “Burned”, e potrà nuovamente prendere fuoco.

Allo script che gestisce il comportamento di questo strumento è anche affidato il compito di tenere traccia della velocità dello strumento così da poter decidere se all'impatto con la fiamma vadano o meno generati dei lapilli.

### 5.2.3 Realizzazione flabello

Il flabello (Fig. 38) è stato l'ultimo degli strumenti realizzati.



*Figura 38 Realizzazione flabello nell'applicazione*

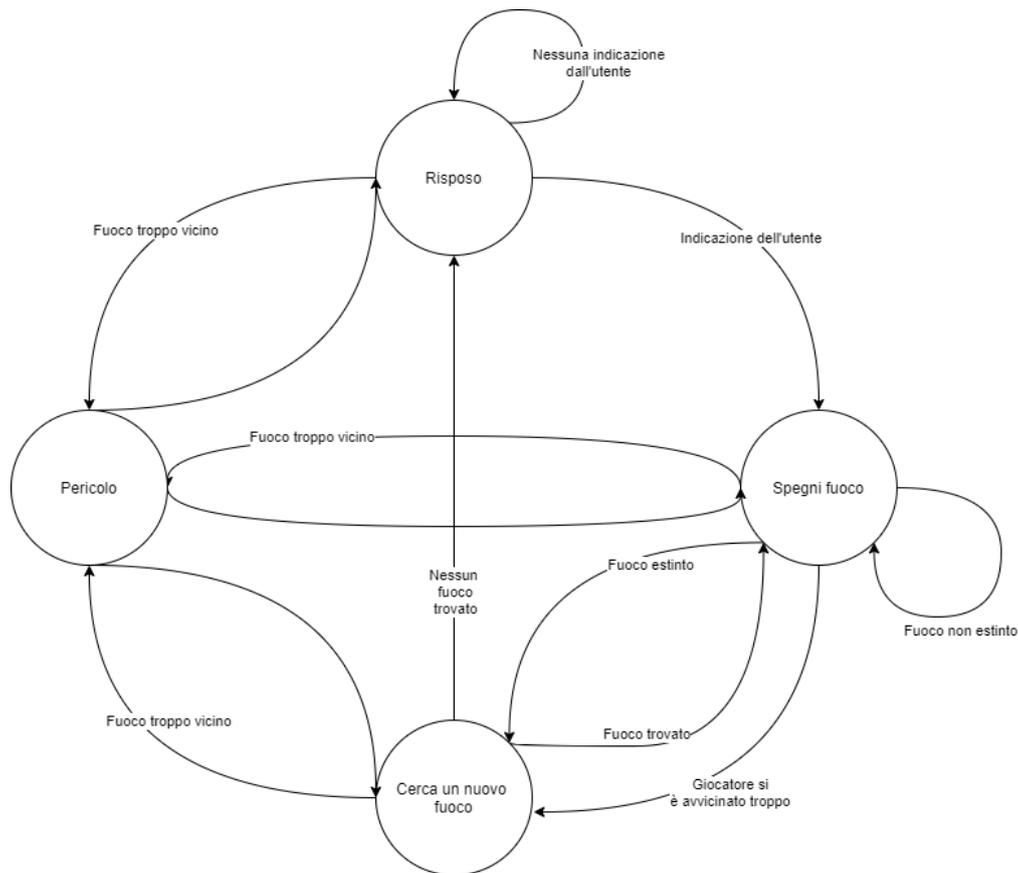
Viene utilizzato per soffocare le fiamme in modo del tutto analogo a quello della pala e per questo non è stato necessario implementare un comportamento specifico. L'adattamento del comportamento della pala a questo strumento ha richiesto però una modifica nella gestione dei lapilli. Oltre alla possibilità che alcuni frammenti di combustibile incandescente si spargano come conseguenza di un utilizzo troppo energico dello strumento, la conformazione del flabello, che è composto da battenti flessibili, apre il fianco alla possibilità che parte del materiale incandescente o in fiamme resti imprigionato nello strumento e, al successivo utilizzo, venga sparso non solo nell'area di azione dello strumento, ma anche alle spalle dell'operatore. Per evitare che questo accada nell'uso del flabello è previsto che, dopo ogni colpo assestato su una porzione di terreno in fiamme, i battenti siano scossi per assicurarsi che eventuali lapilli non vengano sparpagliati. Il comportamento descritto è stato realizzato come segue: al contatto dei battenti con il combustibile in fiamme questi si caricano con un certo numero di lapilli variabile e casuale, quando il contatto viene interrotto e lo strumento viene rimosso dalla zona incendiata, si avvia un timer di qualche secondo in cui l'operatore non deve agitare con forza lo strumento per non provocare lo spargimento dei lapilli imprigionati nei battenti. Allo scadere del tempo previsto i lapilli si "disattivano" e lo strumento può nuovamente essere usato senza il rischio di diffonderli.

## 5.3 NPC

Con la realizzazione di un sistema di propagazione dell'incendio e degli strumenti necessari per contrastarne la diffusione, l'applicazione presentava tutte le caratteristiche necessarie per valutare le azioni ed i comportamenti di un operatore riguardo all'uso delle attrezzature in una situazione di emergenza. Risultava tuttavia impossibile valutare la capacità del soggetto di muoversi in uno spazio in cui fossero presenti altre persone e quindi la sua attenzione, non solo verso sé stesso e verso le corrette azioni da svolgere nell'usare gli strumenti, ma anche nel non creare situazioni potenzialmente pericolose per altri. Con questo obiettivo in mente, si è proceduto con l'aggiungere alla simulazione alcuni NPC che lavorassero insieme all'utente aiutandolo nel suo compito.

Prima di cominciare ad implementare il comportamento che gli NPC avrebbero dovuto tenere, si è cominciato a realizzare le animazioni di utilizzo dei vari strumenti. Queste sarebbero state usate per tutti gli NPC presenti nella scena, sia quelli "attivi" che quelli "passivi". Per produrle sono stati usati video di riferimento girati al Centro di formazione dell'AIB di Peveragno, in cui un istruttore dimostra l'uso dei vari strumenti. Basandosi sui video di riferimento si sono scomposte le animazioni in tre fasi, che sono state realizzate separatamente in modo da poterle combinare e riutilizzare se necessario. Le fasi in cui si sono scomposte le animazioni sono: trasporto, utilizzo e passaggio tra queste due.

Realizzate le animazioni utili a riprodurre ogni aspetto dell'uso degli strumenti, si è passati alla realizzazione della macchina a stati che governa la logica degli NPC.



Nel seguito si andranno ad analizzare più nel dettaglio gli aspetti implementativi dei vari stati e delle condizioni di passaggio da uno stato ad un altro.

Il comportamento e il movimento dell'NPC nell'ambiente è gestito tramite la definizione di quattro aree circolari distinte con dimensioni diverse e centrate sull'NPC, e due vettori (Fig. 38), utilizzati rispettivamente per controllare la presenza di ostacoli o altri elementi nella scena e per individuare la corretta direzione in cui muoversi.

In particolare, dalla zona più ampia a quella più stretta, si hanno:

- *Look Radius (raggio 2m)*, l'area più grande utilizzata per effettuare una ricerca generica di fuochi da spegnere;
- *Step Forward (raggio 1.7m)*, l'area in cui l'NPC controlla se siano presenti fuochi che può gestire senza che sia necessario interrompere l'azione di spegnimento;
- *Stopping Distance (raggio 1.4m)*, l'area usata per determinare quando si è raggiunto l'obiettivo attualmente in carico all'NPC;

- *Step Back* (raggio 1m), l'area nella quale il rilevamento di un fuoco indica che l'NPC è troppo vicino e deve allontanarsi.

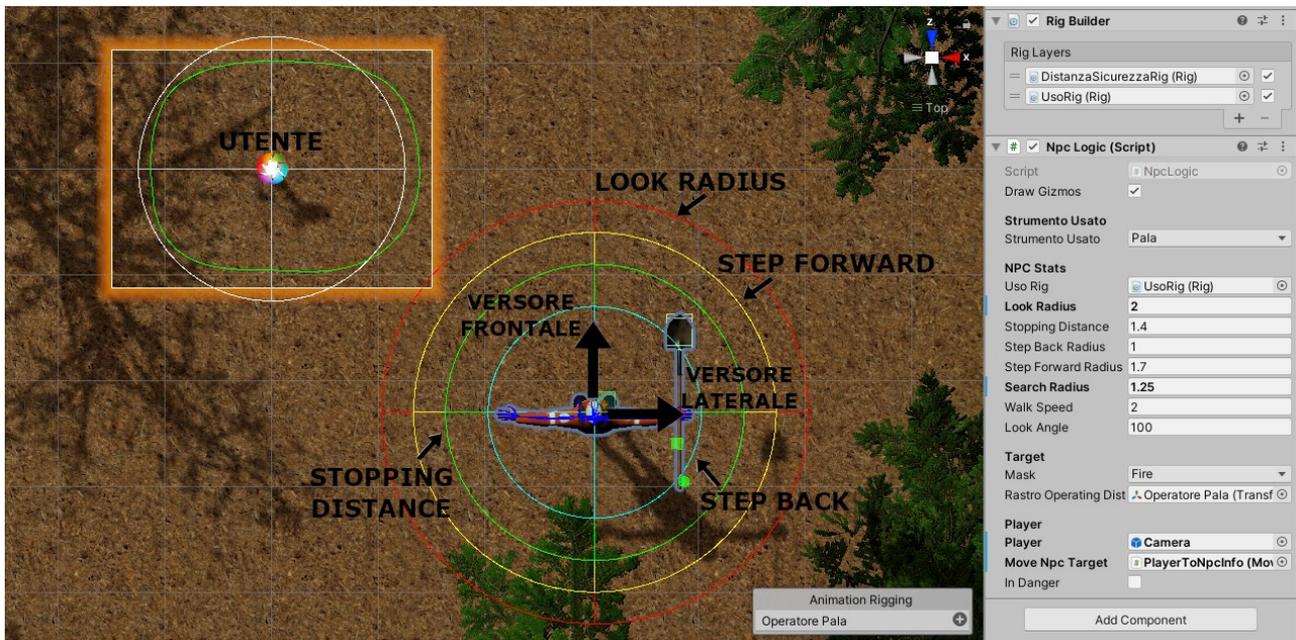


Figura 39 NPC e aree di controllo

Come si può notare dalla Fig. 39, la dimensione di queste aree è facilmente gestibile dall'editor di Unity in modo da poter sperimentare diverse combinazioni di valori per variare il comportamento e per poter adattare lo stesso script di gestione della logica ad ogni NPC, indipendentemente dallo strumento che impugna.

L'NPC inizia dallo stato di "Riposo", in cui rimane in attesa di un primo comando dell'utente, che non viene impartito con un'azione specifica, ma semplicemente avvicinandosi al fuoco. Ad una distanza di 2m dal fronte vengono segnalati a tutti gli NPC i fuochi ritenuti più opportuni, cioè quei fuochi che si trovano ad una distanza tale da essere contemporaneamente oltre la distanza di azione dell'utente e oltre la distanza di sicurezza, ma non troppo lontani dall'utente in modo che gli NPC siano comunque ad una corretta distanza per lavorare in squadra: rimanendo quindi non troppo vicini, ma neanche troppo lontani. In particolare, vengono prese in considerazione due aree di 1m a partire dall'intersezione del fronte di fuoco con il bordo dell'area che indica la distanza di sicurezza dal giocatore (Fig. 40); in queste aree viene selezionato il fuoco più lontano dall'utente. Nel seguito ci si riferirà a questi fuochi come quelli "indicati dall'utente" in quanto è lo script che identifica l'utente

che invia allo script di gestione degli NPC le informazioni su questi fuochi (destra e sinistra) tramite un evento che viene intercettato e gestito appunto dallo script di gestione degli NPC.

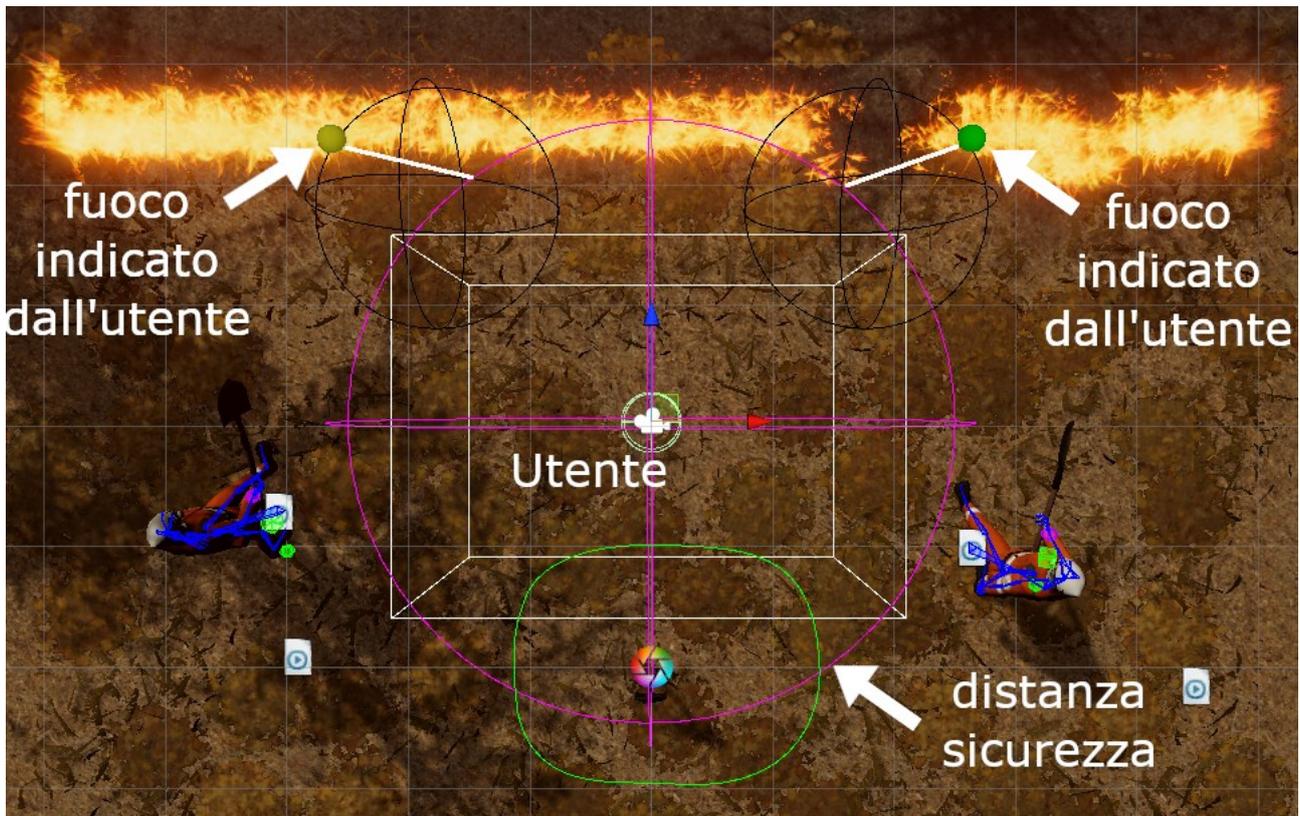


Figura 40 Visualizzazione fuochi indicati dall'utente

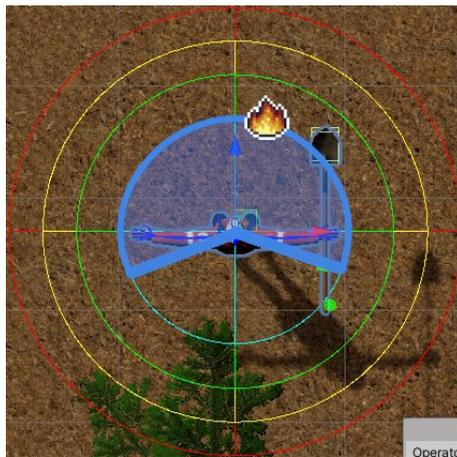
Ogni NPC valuterà quale dei fuochi segnalati è di sua competenza; l'utente, ogni secondo, segnala due fuochi, uno alla sua sinistra e uno alla sua destra. Gli NPC valutano poi due vettori, uno che collega la posizione del giocatore a quella dell'NPC e uno che collega la posizione del giocatore alla posizione del fuoco segnalato ed eseguono il prodotto scalare tra i due. Se il segno del prodotto scalare è positivo fuoco ed NPC si trovano dallo stesso lato, altrimenti si trovano su lati opposti. In caso di fuoco presente sullo stesso lato, l'NPC lo prenderà in carico e scarterà l'altro in quanto non di sua competenza. Questo controllo si è reso necessario per evitare che due NPC si trovassero a lavorare nella stessa zona, non solo interferendo l'uno con il lavoro dell'altro, ma anche mandando un messaggio sbagliato ai fini dell'apprendimento.

Raggiunto il fuoco indicato dall'utente tramite avvicinamento al fronte di fuoco come precedentemente descritto, l'NPC comincerà l'azione di spegnimento, al compimento della quale valuterà l'area circostante al fine di selezionare il prossimo fuoco su cui agire. La fase decisionale si articola in diverse sottofasi, in ognuna delle quali l'NPC controlla aree sempre più generali. Per prima cosa viene controllata una zona specifica, che può essere in direzione opposta all'utente, se utente ed NPC sono vicini, o in direzione dell'utente se utente e NPC sono lontani. Questo permette all'NPC

di non si allontanarsi mai troppo dall'utente e mantenersi contemporaneamente a debita distanza. Se non viene individuato un fuoco nella zona esaminata si considera un'area più grande raggiungibile dall'NPC con un piccolo movimento paragonabile ad un passo in avanti, che consente di non interrompere l'azione di spegnimento; se neanche così si sono individuati obiettivi validi, si controlla una zona ancora più ampia che, essendo appunto più ampia, prevede la necessità di riposizionarsi interrompendo l'azione di spegnimento. Se continuano a non essere trovati fuochi gestibili, si controllano le indicazioni fornite dall'utente, che nel frattempo non ha mai smesso di fornire indicazioni. Se al termine di tutti i controlli, non è stato possibile prendere in carico nessun fuoco, l'NPC si riposiziona in una zona considerata sicura, lontano dal fronte di fuoco in direzione opposta a quella di propagazione, e ritornerà nello stato di "Riposo".

Durante lo svolgimento dei propri compiti è possibile che l'NPC venga raggiunto dal fuoco che si sta diffondendo e che quindi debba riposizionarsi per evitare di trovarsi in una situazione di pericolo. Il controllo è effettuato continuamente e, oltre alle informazioni presentate in precedenza, si basa anche sul cono di vista dell'NPC, definito come un'area di 200° all'interno della circonferenza di "Step Back" (Fig. 40), che consente di distinguere tra le tre diverse situazioni di pericolo che si possono verificare.

- Il fuoco è troppo vicino ed è all'interno del cono di vista dell'NPC (Fig. 41). In questo caso l'NPC può semplicemente spostarsi all'indietro e il fuoco identificato come pericoloso viene preso in carico come successivo bersaglio.



*Figura 41 Fuoco all'interno del cono di vista dell'NPC*

- Il fuoco è troppo vicino, è in vista dell'NPC, ma è ad una distanza dall'utente tale per cui l'NPC, per poterlo spegnere, dovrebbe posizionarsi troppo vicino all'operatore, non rispettando la distanza di sicurezza. Anche in questo caso è sufficiente che l'NPC si sposti

leggermente; lo spostamento avverrà però sia indietro che in direzione opposta al giocatore così da mettere più distanza possibile dal fuoco. Non è possibile assegnare il fuoco che ha scatenato la situazione di pericolo come successivo bersaglio perché troppo vicino all'utente.

- Il fuoco è troppo vicino e non è nel campo di vista dell'NPC (Fig. 42). Questa situazione è quella di maggior pericolo, il fuoco sta aggirando l'NPC impedendogli le vie di fuga. L'NPC in questo caso smette qualsiasi operazione e si ripositiona arretrando maggiormente verso una zona sicura, prima di tornare a controllare l'area in cerca di fuochi da spegnere.



*Figura 42 Fuoco fuori dal cono di vista dell'NPC*

Altro aspetto che viene considerato durante l'intero svolgimento delle operazioni è il mantenimento della distanza di sicurezza. Gli NPC sono programmati in modo tale che non possano avvicinarsi ad una distanza inferiore a quella di sicurezza all'utente, ma nel momento in cui un NPC sta agendo sul fuoco ed è l'utente ad avvicinarsi è lui a commettere un errore. In un primo momento si è pensato di segnalare semplicemente l'errore e lasciare che l'NPC rimanesse alla sua posizione; questa idea è stata scartata in quanto si è valutato che interrompendo il lavoro dell'NPC e facendolo allontanare si sarebbe evidenziato maggiormente il comportamento sbagliato dell'utente, mostrandogli contemporaneamente il comportamento corretto da tenere. Ciò ha portato alla possibilità che l'NPC, continuando ad allontanarsi, si trovasse all'esterno dell'area giocabile; la situazione è quindi stata gestita riposizionandolo alla posizione iniziale ed impostandolo nuovamente nello stato di "Riposo".

## 5.4 Sistemi particellari ed effetti grafici

Un sistema di particelle simula ed esegue il rendering di molte piccole immagini o mesh, chiamate particelle, per produrre un effetto visivo. Ogni particella in un sistema rappresenta un singolo

elemento grafico nell'effetto. Il sistema simula ogni particella collettivamente per creare l'impressione dell'effetto completo. I sistemi di particelle sono utili quando si desidera creare oggetti dinamici come fuoco, fumo o liquidi difficilmente realizzabili con una mesh (3D) o sprite (2D), che risultano invece più efficaci nel rappresentare oggetti solidi (Unity, 2020). Per realizzare i sistemi particellari presenti nell'applicazione si è utilizzato il *Visual Effect Graph*. Questo package di Unity è stato scelto perché molto efficiente dal punto di vista delle prestazioni, in quanto consente di simulare il comportamento delle particelle utilizzando la GPU invece che la CPU.

Al momento della realizzazione dei sistemi particellari nel contesto del lavoro di tesi questa tecnologia era appena stata rilasciata e non era presente alcuna documentazione a riguardo; è stato quindi necessario uno studio approfondito dello strumento tramite diversi esperimenti per riuscire ad ottenere l'effetto finale, con tempi di sviluppo maggiori. I particellari realizzati risultano gradevoli ed efficaci nel rappresentare l'effetto desiderato, inoltre durante il loro sviluppo si è lavorato in modo che questi fossero il più possibile efficienti.

I sistemi particellari presenti nell'applicazione sono tre: fuoco, fumo e polvere e detriti sollevati dagli strumenti.

Per quanto riguarda gli effetti grafici realizzati verrà discusso come si è gestito l'annerimento del terreno al passaggio del fuoco.

### 5.4.1 Visual Effect Graph

Il *Visual Effect Graph* è il più recente sistema di simulazione implementato da Unity per creare effetti visivi in tempo reale. Si basa su un sistema grafico di nodi e blocchi (Fig. 43) che, connessi tra loro, permettono di realizzare i diversi effetti visivi desiderati.

I nodi possono essere connessi per eseguire i vari calcoli necessari a fornire l'output desiderato che può essere utilizzato come informazione di input per i vari blocchi che rappresentano le trasformazioni da applicare in ordine alle particelle.

I blocchi sono contenuti in quelli che vengono chiamati “contesti” e si dividono in: "Spawn, Initialize, Update e Output. Spawn è la quantità di particelle da generare ed il tempismo con cui generarle. In Initialize sono contenuti i blocchi che servono a definire le caratteristiche iniziali delle particelle. In Update, sono contenuti i blocchi che modificano le proprietà delle particelle nel tempo. Infine, con Output è definito il modo in cui le particelle devono essere reindirizzate.

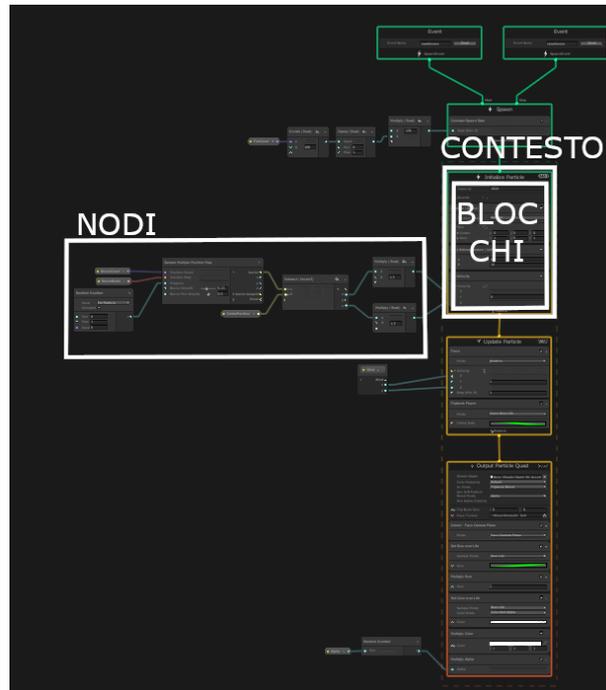


Figura 43 Visual Effect Graph

Ogni sistema particellare deve essere composto almeno dal contesto di Spawn, Initialize e Output.

Come detto, il punto di forza di questo sistema risiede nel fatto che la simulazione delle particelle viene effettuata sulla GPU invece che sulla CPU. Ciò permette di simulare contemporaneamente molte più particelle senza impattare sulle prestazioni dell'applicazione, ma presenta anche alcuni svantaggi: essendo simulato sulla GPU non è infatti possibile sfruttare il sistema fisico presente nel Game Engine e realizzare interazioni tra particelle simulate e gameplay risulta più complesso e limitato (O'Reilly, 2018).

In Fig. 44 sono mostrate le varie caratteristiche che distinguono le due diverse tipologie di simulazioni. Nel caso del lavoro di tesi, per quanto fossero importanti le interazioni delle particelle con le azioni dell'utente, si è ritenuto, visto l'elevato numero di particelle presente, fosse meglio dare più importanza alle prestazioni per ottenere un'applicazione fluida, che non influisse negativamente sull'esperienza generale dell'utente.

	CPU Particle System	GPU Visual Effect Graph
Particle Count	Thousands	Millions
Simulation	Simple	Complex
Physics	Underlying Physics System	Primitives, Depth Buffer, Scene Representation (E.g. SDF)
Gameplay Readback	Yes	No* <small>* Potentially small data with latency</small>
Other	-	Can read frame buffers

Figura 44 Comparazione prestazioni di un sistema particellare simulato sulla CPU rispetto ad uno simulato sulla GPU

## 5.4.2 Sistema particellare del fuoco

Questo sistema particellare è stato quello su cui si è lavorato maggiormente sia perché era il più importante per rendere efficace e realistica la simulazione, sia perché presentava sfide complesse a livello tecnico. Per realizzare un incendio su larga scala occorre utilizzare un gran numero di particelle e, spesso, in applicazioni di questo genere le particelle sono realizzate tramite una tecnica chiamata *billboarding*. Il *billboarding*, che prevede l'utilizzo di un singolo poligono raffigurante un'immagine bidimensionale dell'oggetto tridimensionale che si vuole rappresentare, era spesso utilizzata in passato per rappresentare oggetti tridimensionali lontani dal giocatore in modo da non dover renderizzare l'intero modello 3D ed è utilizzata ancora oggi sia con lo stesso fine, che appunto nei sistemi particellari per ridurre la complessità della singola particella. Questa tecnica però si fonda sul presupposto che l'oggetto sia lontano e sulla possibilità di poter orientare il *billboard* in modo perpendicolare al piano di vista della camera per dare l'illusione all'utente di stare osservando un oggetto tridimensionale; entrambi i requisiti non potevano essere realizzati nell'applicazione perché, essendo un'applicazione VR, l'utente ha una percezione maggiore della profondità e degli spazi tridimensionali e risulta difficile ruotare un oggetto senza che l'effetto di mascheramento risulti palese, rompendo così l'immersione. L'utente inoltre, si avvicina molto al fuoco ed ha quindi la possibilità di osservarlo molto da vicino.

Per cercare di non utilizzare dei *billboard* si è provato a realizzare le particelle del fuoco con delle mesh sferiche che, unite, avrebbero composto le singole fiamme. Ci si è resi conto subito dell'impraticabilità della soluzione: per rappresentare una sola fiamma occorreva generare centinaia di particelle e, ad ognuna di queste, applicare forze e movimenti opportuni per simularne il movimento; la complessità di questo approccio lo ha reso quindi non realizzabile. Si è quindi deciso, nonostante l'effetto potesse non essere sempre ottimale, di sfruttare la natura spesso lamellare delle fiamme e di utilizzare comunque una tecnica simile al *billboarding*. Sono state usate delle immagini bidimensionali animate a rappresentazione delle fiamme, si è dato loro una posizione fissa nello spazio tridimensionale non orientandole sempre verso la camera in modo da evitare effetti inverosimili dovuti alla rotazione, e si è cercato di posizionare le singole fiamme in modo che si intersecassero il più possibile tra loro per dare volume al fuoco.



Figura 45 NPC impegnato nell'attività di spegnimento del fuoco

Il risultato ottenuto (Fig. 45) presenta alcune criticità (se osservato perfettamente dall'alto si nota la natura bidimensionale delle particelle) e può essere oggetto di miglioramenti futuri, ma nella maggior parte delle situazioni si è dimostrato efficace nel rappresentare il fuoco e ha permesso di ridurre la complessità computazionale legata alle singole particelle consentendo al sistema particellare di scalare meglio senza impattare sulle prestazioni dell'applicazione.

Il sistema particellare realizzato per simulare il fuoco espone alcuni parametri, che possono essere usati per manipolarne l'aspetto.

- *Size*: questo parametro indica la dimensione del terreno occupato dal sistema particellare, non influisce sull'altezza della fiamma, ma solo sull'area coperta dalle fiamme (Fig. 46). Il suo valore può variare tra 0 e 1 e viene impostato all'inizio della simulazione in accordo con la dimensione scelta per le *tile*.



Figura 46 Effetto parametro *Size*

- *Strenght*: permette di modificare l'altezza della fiamma (Fig. 47). Il suo valore è compreso tra 0 e 1 e dipende dal valore di combustibile rimasto nella *tile* sottostante. All'inizio è impostato ad un valore pari alla percentuale di carburante presente nella *tile* rispetto a quella massima che essa può contenere; poi, viene decrementato o aumentato insieme al parametro di carburante della *tile*;

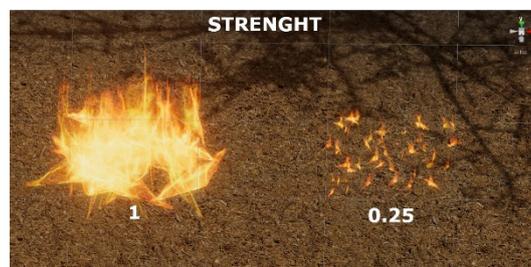


Figura 47 Effetto parametro *Strenght*

- *Color*: questo parametro controlla il colore della fiamma. Oltre a cambiarne il colore, è possibile renderla più o meno brillante (Fig. 48).



Figura 48 Effetto aumento di luminosità

### 5.4.3 Sistema particellare del fumo

Per il fumo si è implementata una tecnica particolare che cerca di replicare il comportamento analizzato dallo studio di diversi video di incendi reali. Da questi video si nota come il fumo non scaturisca principalmente dalla zona dove sono presenti le fiamme, ma dal terreno dove il fuoco è già passato e ha bruciato la vegetazione presente. Il fumo viene poi spinto, a causa delle correnti d'aria che si generano, verso il fronte di fuoco dove il calore generato dalle fiamme lo spinge verso l'alto generando la tipica "colonna di fumo".

Per replicare questo comportamento si è reso necessario riuscire a tracciare la posizione del fonte di fuoco durante tutto il suo sviluppo tramite l'utilizzo di quattro punti di riferimento, utilizzati per generare una curva di Beziér con la medesima forma del fronte. I punti di riferimento sono spostati mentre il fronte avanza con l'obiettivo di seguirne il movimento, e sono identificati tramite appositi *GameObject* nella scena. Identificati i contorni del fronte, le particelle sono generate nel punto in cui l'incendio si è sprigionato, ad ognuna di esse viene applicata una forza che le spinge verso il bordo dell'incendio, al raggiungimento del quale vengono spinte verso l'alto dove si dissolveranno lentamente.

Le singole particelle sono composte da un semplice *billboard* la cui immagine non è statica, ma animata e raffigura una nuvola di fumo che si dissolve.

Altro messaggio importante che il fumo trasmette è la direzione del vento. In base a questa informazione il fuoco va affrontato in modo opportuno e il volontario deve quindi saper riconoscere la situazione e agire in modo opportuno. Per questo motivo in presenza di vento al sistema particellare viene sommata una forza che muove le particelle nella direzione del vento con un'intensità proporzionale alla forza del vento (Fig. 49).



Figura 49 Effetto del vento sul sistema particellare del fumo

La Fig. 50 mette a confronto un incendio reale e quello presente nella simulazione; nonostante le dimensioni dei due incendi non siano comparabili le caratteristiche principali del fronte di fuoco e della colonna di fumo sono presenti.



Figura 50 Comparazione dell'effetto di diffusione dell'incendio reale e simulato: a sinistra la diffusione di un incendio reale, a destra la diffusione dell'incendio nella simulazione

#### 5.4.4 Sistemi particellari di interazione degli strumenti

I sistemi particellari utilizzati per evidenziare un'azione effettuata con un determinato strumento non hanno il solo scopo di rendere visivamente bella l'applicazione, ma rivestono un ruolo molto importante nel segnalare all'utente che una sua azione è stata riconosciuta dal sistema il quale ha reagito in un modo specifico. Pertanto, nonostante a livello tecnico questi effetti non risultino particolarmente complicati da realizzare, rimangono un elemento di primaria importanza.

Sono stati realizzati due diversi sistemi particellari per gestire e segnalare altrettanti tipi di interazioni: uno per evidenziare l'azione dello spostamento del combustibile quando si usa la pala o il rastrello, ed un'altro per indicare l'azione di contatto tra pala o flabello e la fiamma.

Il sistema particellare usato nelle interazioni di pala e rastrello è composto da tre elementi distinti che combinati insieme generano l'effetto finale: polvere, foglie e piccoli sassi, cioè quegli elementi che si possono trovare presenti sul terreno in cui l'utente agisce. A differenza della polvere e i piccoli sassi che sono sempre presenti ad indicare che effettivamente lo strumento è entrato in contatto in modo corretto con il suolo, le foglie sono visualizzate solo se lo strumento è mosso su una *tile* in cui

è presente del combustibile. Questa differenza, seppur piccola, permette all'utente di capire immediatamente se continuare ad agire in un determinato punto sia sensato oppure se debba spostarsi.

Il sistema particellare che indica il contatto tra pala o flabello con la fiamma è invece più semplice; è infatti composto da una sola tipologia di particelle che, al contatto dello strumento con il fuoco o con il terreno, si generano ricreando l'effetto della polvere sollevata dal contatto.

L'elemento di complessità presente all'interno di questi sistemi è prevalentemente dato dal tracciamento della punta dello strumento: la sua posizione, infatti, deve essere monitorata per potere generare nel posto corretto i vari effetti.

#### 5.4.5 Annerimento del terreno

Un elemento grafico usato per evidenziare l'effetto di bruciatura è l'annerimento del terreno; insieme a questo occorre ricordare quelli già citati e usati per far "decomporre" gli oggetti raffiguranti erba e foglie, per l'utilizzo del rastro e per il passaggio del fuoco.

Per realizzare questo effetto si è studiato ed utilizzato il sistema di generazione del terreno implementato nel Game Engine. Unity, infatti, mette a disposizione un proprio sistema per la creazione e la gestione dei paesaggi offrendo la possibilità di creare territori di diverse dimensioni, modificarne la conformazione per creare depressioni o montagne, posizionare alberi ed altri elementi della vegetazione, modificarne le texture per identificare diversi tipi di terreno: è proprio quest'ultima caratteristica che è stata sfruttata per poter realizzare l'effetto in questione.

Il sistema di texture con cui il terreno può essere "colorato" è gestito posizionando ogni texture su un livello diverso, come avviene nei moderni programmi di editing di immagini; ogni livello poi viene fuso con gli altri tramite un apposito canale alpha che ne definisce la trasparenza. Le informazioni riguardanti la trasparenza di un determinato livello sono contenute in una matrice tridimensionale di valori reali chiamata *Alphamap[,]* e per navigare questa mappa occorre indicare tre parametri: posizione *x* sulla mappa del punto, posizione *y* sulla mappa del punto e livello in cui la texture che si vuole considerare è stata salvata.

Utilizzando questi tre valori si riesce ad accedere alle informazioni riguardanti il valore di trasparenza di un determinato livello in un punto della mappa e si potrà semplicemente leggere oppure modificare.

Si è quindi generato il terreno di gioco nel modo opportuno, avendo cura di aggiungere un livello contenente la texture raffigurante il terreno bruciato, così da poterla usare quando effettivamente fosse stato necessario. Per poter effettivamente applicare la texture, andando ad assegnare alla mappa del livello opportuno un valore adeguato a renderla visibile, è stato necessario individuare il corretto punto sulla mappa, in quanto l'unica informazione conosciuta risiedeva nella posizione globale 3D della *tile* contenente il fuoco.

Questo è stato possibile tramite le formule:

$$x = \left( \frac{\text{coordinata } x \text{ del punto} - \text{coordinata } x \text{ della posizione del terreno}}{\text{larghezza del terreno}} \right) * \text{larghezza mappa}$$

$$y = \left( \frac{\text{coordinata } z \text{ del punto} - \text{coordinata } z \text{ della posizione del terreno}}{\text{profondità del terreno}} \right) * \text{altezza mappa}$$

Parametro	Significato
<i>x</i>	Ascissa del punto sulla mappa.
<i>y</i>	Ordinata del punto sulla mappa.
Coordinata <i>x</i> del punto	Ascissa del punto sul terreno.
Coordinata <i>y</i> del punto	Ordinata del punto sul terreno.
Coordinata <i>x</i> della posizione del terreno	Ascissa, in coordinate globali della scena, a cui è posizionato il terreno (si riferisce all'angolo in basso a sinistra).
Coordinata <i>y</i> della posizione del terreno	Ordinata, in coordinate globali della scena, a cui è posizionato il terreno (si riferisce all'angolo in basso a sinistra).
Larghezza del terreno	Dimensione del terreno sull'asse delle ascisse.
Profondità del terreno	Dimensione del terreno sull'asse delle ordinate.

---

Larghezza mappa	Risoluzione orizzontale dell'immagine contenente le informazioni di trasparenza.
Altezza mappa	Risoluzione verticale dell'immagine contenente le informazioni di trasparenza.

---

Importante da sottolineare come la risoluzione delle mappe contenenti le varie texture sia essenziale non solo per migliorare la qualità grafica delle stesse, ma anche perché, cambiando la risoluzione, cambiano larghezza e altezza della mappa e, di conseguenza, i valori da utilizzare per mappare correttamente un punto nel mondo tridimensionale su essa.

In possesso delle informazioni necessarie è stato possibile accedere al valore della mappa e modificarlo in modo opportuno per modificare l'estetica del terreno solo laddove fosse passato un fuoco.

Questo procedimento si è rilevato molto oneroso in quanto le funzioni messe a disposizione per la gestione della mappa prevedevano unicamente la possibilità di leggere e scrivere una grossa porzione di mappa e non un singolo punto in modo mirato; inoltre, ogni fuoco, quando acceso, avrebbe dovuto modificare la mappa alla sua posizione relativamente al suo stato di avanzamento sulla *tile*. Al crescere del numero di fuochi presenti contemporaneamente, la riscrittura di grosse porzioni di mappa portava l'applicazione a rallentare. Per alleggerire il carico computazionale si è quindi deciso di aggiornare le texture del terreno ad intervalli regolari di qualche secondo, i singoli fuochi non avrebbero più riscritto la mappa, ma semplicemente indicato lo stato di avanzamento in una matrice adeguata; al successivo aggiornamento, l'intera mappa sarebbe stata riscritta in funzione dei valori presenti nella matrice. Questo approccio è stato vincente ed ha permesso di utilizzare il sistema di terreno già presente senza dover cercare soluzioni alternative.



*Figura 51 Effetto di annerimento del terreno*

In Fig. 51 è mostrato l'effetto finale di annerimento del terreno. All'interno del fronte di fuoco circolare il terreno è nero e non sono più presenti elementi di vegetazione.

## 6 Conclusione e sviluppi futuri

Nonostante il periodo di pandemia da COVID-19 non abbia permesso di effettuare i test per dimostrare l'efficacia dell'applicazione, i riscontri ottenuti dagli esperti del Corpo AIB Piemonte sono stati molto positivi. L'applicazione è stata descritta come molto realistica, al punto che, i volontari che hanno potuto provare l'esperienza, hanno messo in atto spontaneamente i comportamenti automatici che tengono di fronte ad un vero incendio, come cercare un collega per controllare che tutto proceda correttamente.

Gli obiettivi preposti per sviluppare un sistema di supporto all'addestramento dei volontari dell'AIB sono stati raggiunti. L'applicazione fornisce sia una modalità educativa sull'uso degli strumenti sia di verifica dell'apprendimento delle nozioni esposte. La diffusione dell'incendio è realistica e la sua realizzazione grafica efficace nell'immergere l'utente all'interno dello scenario proposto. L'applicazione riesce ad offrire inoltre una simulazione variabile in tempo reale per poter osservare come l'utente cambia i suoi comportamenti in accordo con le condizioni dell'ambiente che lo circonda.

Nonostante tutto, l'applicazione presenta ancora margini di miglioramento come:

- migliorare ulteriormente la propagazione dell'incendio aumentando la varietà di situazioni possibili aggiungendo, ad esempio, differenti tipologie di combustibile o differenti tipi di innesco;
- migliorare il vento la cui realizzazione, non essendo un requisito principale, è stata supportata da uno studio di tipo qualitativo e non quantitativo; un più accurato studio dell'effetto del vento sull'incendio e dei modelli matematici che lo descrivono potrebbe portare ad una maggior varietà di situazioni proposte e permetterebbe lo studio e l'addestramento in casi di pericolo derivanti da cambi repentini della direzione e dell'intensità del vento;
- aumentare le interazioni possibili con gli NPC; si potrebbe aggiungere la possibilità di impartire loro dei comandi espliciti per farli indietreggiare o agire;
- aggiungere una modalità multigiocatore in cui, al posto degli NPC, vi siano altri utenti reali aiuterebbe a migliorare la valutazione rispetto alla capacità dell'utente di lavorare in gruppo;
- aggiungere altri strumenti per aumentare l'offerta formativa dell'applicazione.

Nel complesso l'applicazione e, in particolar modo la parte tratta in questo elaborato, risulta essere molto flessibile e facilmente ampliabile. Il presente lavoro di tesi aveva come obiettivo quello mettere le basi per il progetto di formazione descritto fornendo al contempo uno strumento utilizzabile e di alto valore formativo e innovativo. Riteniamo che questo obiettivo sia stato raggiunto e che il risultato possa considerarsi una solida base da ampliare con nuove funzionalità per offrire un servizio sempre più ampio.

# BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Blender History.* (s.d.). Tratto da blender: <https://www.blender.org/foundation/history/>
- Corpo Volontari Antincendi Boschivi.* (s.d.). Tratto da Corpo Volontari Antincendi Boschivi: <http://www.corpoaibpiemonte.it/>
- De Zorzi, G., Gregolin, M., Lemessi, A., Ramon, E., Rizzolo, R., Sartori, C., . . . Rizzolo, R. (2009, Aprile 12). *Manuale di formazione di base in materia di incendi boschivi.* Tratto da Regione del Veneto il portale della Regione del Veneto: <https://www.regione.veneto.it/static/www/agricoltura-e-foreste/tipologiediincendioA5.pdf>
- GIMP. (2020, giugno 11). *Wikipedia, L'enciclopedia libera.*, 113624852. Tratto il giorno settembre 16, 2020 da [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=GIMP&oldid=113624852](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=GIMP&oldid=113624852)
- Hunt, D., & Eakes, Y.-H. (2019, maggio 14). *Introducing the Animation Rigging preview package for Unity 2019.1.* Tratto da Unity Blog: <https://blogs.unity3d.com/2019/05/14/introducing-the-animation-rigging-preview-package-for-unity-2019-1/>
- Interreg Alcotra.* (s.d.). Tratto da Interreg Alcotra: <http://www.interreg-alcotra.eu/it/decouvrir-alcotra/les-projets-finances/risk>
- Moohyun Cha, S. H. (2012). A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data. *Fire Safety Journal.* Tratto da [https://pico.polito.it/permalink/f/19j6qfa/TN\\_elsevier\\_sdoi\\_10\\_1016\\_j\\_firesaf\\_2012\\_01\\_004](https://pico.polito.it/permalink/f/19j6qfa/TN_elsevier_sdoi_10_1016_j_firesaf_2012_01_004)
- O'Reilly, J. (2018, 11 27). *Creating explosive visuals with the Visual Effect Graph.* Tratto il giorno 09 15, 2020 da Unity Blog: <https://blogs.unity3d.com/2018/11/27/creating-explosive-visuals-with-the-visual-effect-graph/>
- Regione Piemonte.* (s.d.). Tratto da Regione Piemonte: <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/protezione-civile/incendi-boschivi/che-cose-un-incendio-boschivo>
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wild lands.*
- Sospensione dell'incredulità.* (2020, Aprile 1). Tratto il giorno Giugno 25, 2020 da Wikipedia, l'enciclopedia libera: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Sospensione\\_dell%27incredulit%C3%A0&oldid=111873884](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Sospensione_dell%27incredulit%C3%A0&oldid=111873884)
- Treccani.* (s.d.). Tratto da Treccani: <http://www.treccani.it/enciclopedia/fuoco/>
- Unity. (2020, Settembre 08). *Unity - Manual: Particle systems.* Tratto il giorno 09 14, 2020 da Unity: <https://docs.unity3d.com/Manual/ParticleSystems.html>
- Wikipedia, c. d. (2020, Maggio 14). *Microsoft Visual Studio.* Tratto il giorno Giugno 28, 2020 da Wikipedia, L'enciclopedia libera: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Microsoft\\_Visual\\_Studio&oldid=112994731](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Microsoft_Visual_Studio&oldid=112994731)